



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA  
BARCELONATECH

Escola Politècnica Superior d'Edificació  
de Barcelona

# **MASTER UNIVERSITARI EN CONSTRUCCIÓ AVANÇADA EN L'EDIFICACIÓ**

## **TREBALL FINAL DE MÀSTER**

### **OPTIMITZACIÓ DE SISTEMES CONSTRUCTIUS EN FAÇANA DE FUSTA MITJANÇANT LA SIMULACIÓ COMPUTACIONAL DE LA PROPAGACIÓ D'INCENDIS**

**Autor:** Andreu Segura Casals

**Directores:** Ana María Lacasta Palacio

Maria Pilar Giraldo Forero

**Convocatòria:** Setembre 2019



## Resum

La façana d'un edifici és una de les vies més ràpides de propagació del foc en cas d'incendi, no només per a l'edifici en sí, sinó també per a tot el que l'envolta: edificis pròxims, mobiliari urbà, zones verdes i pèrdues humanes. En la creixent tendència d'emprar recursos més ecològics en la construcció, la fusta s'ha erigit com un dels principals donades les seves bones propietats tant portants com aïllants. En la present investigació s'estudia la propagació vertical de les flames en façanes amb revestiment de fusta. L'objectiu de controlar la propagació en aquesta zona i intentar minimitzar els seus efectes ha estat continu per a els especialistes i, encara ara, un repte. Pel que fa a la normativa del Codi Tècnic de la Edificació espanyola (CTE) en referència a aquest control, es perceben com a molt genèriques i poc flexibles, i menys encara pel que fa a façanes revestides d'un material combustible.

La present investigació té per objecte d'estudi la propagació del foc a través de la façana de fusta considerant el context normatiu existent i explorant els mecanismes que tenen les flames per a propagar-se. Posteriorment, s'estudiarà la incorporació d'elements de protecció passius que retardin l'avançament de l'incendi.

Per tractar el primer punt, s'ha estudiat la reacció de la combustió d'una manera més enfocada a la fusta, les fases de l'incendi i quan succeeix la propagació de la façana. També s'han tingut en compte estudis provinents de països on fins ara no eren considerats referents en aquest àmbit, com la Xina o el Japó, i de més avançats en construccions on la fusta ha sigut més habitual en la construcció, com ho és Suècia. Aquesta investigació es podria presentar, també, com una continuació en la recerca realitzada per M.P. Giraldo en la seva tesis doctoral.

La segona part de la investigació consta d'una fase experimental mitjançant tècniques de modelatge i simulació computacional d'incendis amb el programa *Fire Dynamics Simulator* (FDS). S'han elaborat una sèrie d'escenaris amb diferents valors de combustibilitat per a un revestiment de fusta a la façana. Una segona part de la fase experimental, s'ha centrat en la incorporació d'elements sortints o ràfecs de diferents mesures, col·locacions i l'addició de franges verticals incombustibles.

Aquest estudi ha permès extreure diferents conclusions sobre la influència dels elements passius en la trajectòria de les flames, temperatures assolides i la geometria de la façana.

**Paraules clau:** propagació d'incendis, façana de fusta, simulació computacional d'incendis



## Abstrac

The building's facade is one of the fastest and dangerous spreading ways in case of a fire, not only for the building itself, also for its surroundings: nearby buildings, urban furniture, green areas and human losses. In the increasing tendency to use ecological resources in construction, wood has resulted to be one of the main materials, given its decent structural and insulating properties. The present investigation studies the vertical spreading of flames in facades with wooden coating. The objective of controlling the spread in this area and trying to minimize its effects has been continuous for specialists and, still now, a challenge. Regarding to the *Spanish Technical Building Code* (CTE) regulations in reference to this control, they are perceived to be very generic and inflexible, and less in terms of facades coated with a combustible material.

The purpose of the present investigation is to study the fire spreading of fire through the wooden coated façade, considering the existing normative context and exploring the fire mechanisms of spreading. The incorporation of passive protection elements that delay the advance of the fire will also be studied later.

To deal with the first point, the combustion reaction has been studied focusing on wood, the phases of the fire and the time when the vertical spreading through the façade occurs. It has been taken into account studies from countries where until now were not considered referents, such as China or Japan, and also from more advanced countries in constructions where wood has been a main material, such as Sweden. This investigation can also be presented as a continuation in the research done by M.P. Giraldo in her PhD.

The second part of the research consists of an experimental phase using computational fire simulation with the program *Fire Dynamics Simulator* (FDS). A series of scenarios with different combustibility values for a wooden coat have been tested. A second part of this experimental phase has focused on the incorporation of outer elements or eaves with different measurements, placing and the addition of incombustible vertical strips.

This study has allowed extracting conclusions about the influence of passive protection elements in the flames trajectory, temperatures reached and the façade's geometry.

**Keywords:** Fire spreading, wooden façade, computational fire simulation

# ÍNDEX

<b>Resum .....</b>	<b>3</b>
<b>Abstrac.....</b>	<b>5</b>
<b>ÍNDEX .....</b>	<b>6</b>
<b>INTRODUCCIÓ .....</b>	<b>8</b>
<b>A.- Context .....</b>	<b>8</b>
<b>B.- Objectius de la Investigació.....</b>	<b>9</b>
<b>1. ESTAT DE L'ART .....</b>	<b>10</b>
1.1. Teoria del foc.....	10
1.2. Classificació dels materials de construcció davant la seva reacció i resistència al foc.....	12
1.3. Fusta com a material combustible.....	13
1.4. Fases de l'incendi en l'edificació.....	16
1.5. Propagació vertical d'incendis per la façana .....	19
1.6. Normativa existent sobre elements de protecció passius (ràfecs).....	22
1.7. Casos d'estudi en relació amb la propagació exterior a través de la façana	23
<b>2. FASE EXPERIMENTAL .....</b>	<b>26</b>
2.1. Introducció a la simulació d'incendis .....	26
2.2. Mètodes de simulació d'incendis .....	28
2.3. <i>Fire Dynamics Simulator</i> .....	32
2.4. Casos d'estudi .....	34
2.5. Comparatives segons el revestiment de la façana .....	38
2.6. Comparatives en casos de ràfecs.....	46
2.7. Comparativa del les simulacions dels ràfecs.....	90
<b>3. CONCLUSIONS GENERALS Y PROSPECTIVES.....</b>	<b>100</b>
<b>4. BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>102</b>
<b>5. ÍNDEX DE GRÀFICS.....</b>	<b>105</b>
5.1. Índex de Taules .....	105

5.1. Índex de gràfics .....	108
5.2. Índex de figures .....	109
<b>AGRAÏMENTS .....</b>	<b>111</b>

# INTRODUCCIÓ

## A.- Context

L'ús de materials més sostenibles per al medi ambient en el món de la construcció s'ha vist accelerat en els últims anys ja que ofereixen grans possibilitats en les seves prestacions i aplicacions. Aquesta proliferació, però, ha d'estar sotmesa a la mateixa normativa per tal de garantir les mateixes condicions de seguretat que ofereixen la resta de materials convencionals emprats fins al moment. Dintre dels materials més sostenibles, la fusta es postula com un dels pilars sobre els quals s'han fet nombroses recerques per incorporar-la en la construcció. Un dels perills que hom atribueix a la construcció amb fusta, és la seva facilitat per reaccionar davant el foc i, a l'hora, l'ajuda que suposa en el cas de que s'origini un incendi.

La present investigació tracta sobre la propagació dels incendis a través de la façana de fusta, una de les formes més perilloses que té el foc per assolir els pisos superiors amb devastadores conseqüències. El treball està estructurat en dues parts diferenciades. La primera consta de l'Estat de l'Art sobre l'incendi en general: teoria del foc, classificació dels materials davant la seva reacció el foc i més concretament el comportament de la fusta, la propagació de l'incendi a través de la façana, la normativa existent sobre els ràfecs que actuen com a elements de protecció passius, i, finalment, casos d'estudi realitzats. Es fa una descripció més centrada en el cas de que el material que ocupa el revestiment exterior sigui la fusta.

La segona part del treball consisteix en realitzar una sèrie de simulacions computacionals a través del programa *Fire Dynamics Simulator* (FDS). Es simularan diferents escenaris amb fustes de combustibilitats diferents i, posteriorment, una sèrie de casos amb elements de protecció passius com ho són els ràfecs. Les diferències entre els elements de protecció estaran subjectes a tres variables com són l'amplada, la seva col·locació en la façana i la incorporació de franges de material incombustible. Els resultats es compararan entre ells per tal d'extraure conclusions.

## **B.- Objectius de la Investigació**

### **a.- Objectiu general**

La present investigació pretén contribuir en el coneixement de la propagació del foc a través de la façana feta d'un material combustible com ho és la fusta. Donada la creixent proliferació de programes informàtics que permeten la simulació computacional de fenòmens físics molt complexos, es buscarà també la contribució en aquest camp a base de la simulació experimental d'escenaris genèrics, ja que realitzar aquest tipus d'assajos en la vida real és molt costós i complicat d'obtenir resultats significatius.

### **b.- Objectius específics**

- Conèixer i estudiar l'estat de l'art en relació amb les fases que té un incendi i més concretament en la propagació d'aquest, així com els mètodes per a la seva investigació.
- Aprofundir en els coneixements de la propagació d'incendis a través de la façana de fusta mitjançant la simulació computacional de fluids.
- Experimentar amb elements de protecció passius en la façana per tal de retardar al màxim la propagació.
- Aportar dades que ajudin a la millora de la norma de protecció d'incendis en façana.

# 1. ESTAT DE L'ART

Aquesta investigació parteix des de l'experiència acumulada en els últims 50-60 anys, la qual ha estat basada en mètodes experimentals per tal de construir i desenvolupar models numèrics que permetin explicar la dinàmica de fluids en la propagació del foc en ambients exteriors. Val a dir que aquestes investigacions, han consolidat la creació d'un coneixement prou sòlid com per a implementar normatives de protecció contra incendis i inclús el desenvolupament de softwares que permeten recrear d'una manera fiable el comportament d'aquests.

A nivell territorial, a Espanya no ha proliferat la investigació en aquest camp fins ben entrat el segle XXI i tota la informació anterior prové d'assajos realitzats en països com el Canadà, Japó, Nova Zelanda, Estats Units, Finlàndia o el Regne Unit (Giraldo, 2012). Probablement, aquest fet ve donat per l'avenç tecnològic en aquests països respecte a Espanya.

Per donar una visió més detallada de tot el que succeeix en un incendi es procedirà a fer una petita explicació de la reacció de combustió que provoquen les diferents fases d'un incendi convencional per així poder analitzar millor els resultats en la part experimental en relació a la propagació d'incendis a través de la façana.

## 1.1. Teoria del foc

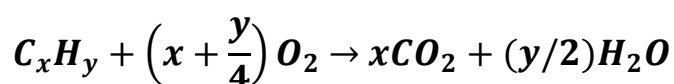
El foc es pot definir com el producte d'una reacció redox en forma de llum i calor (exotèrmica) anomenada combustió, entre un comburent oxidant i un combustible gràcies a l'aportament d'una energia d'activació a la reacció. Aclarir també que en una reacció de combustió pot existir flama o no. La flama es compona de massa gasosa dels materials reactius en estat incandescent, provocant aquesta manifestació de llum.

Per a que el foc pugui ser originat s'han de donar tres circumstàncies al mateix temps per aconseguir una reacció en cadena i aconseguir un foc sostingut. Primerament es necessita un material combustible que pugui reaccionar amb un comburent quan se li aporta energia en forma de calor, anomenada també font d'ignició. Existeixen molts tipus de substàncies combustibles pel que fa a la reacció de combustió, però per a la present

investigació només s'anomenaran alguns dels que s'empren en la construcció: poliestirè expandit o extruït, poliuretà, polietilè i cel·lulosa.

Pel que fa als comburents, en el 99,99% dels casos és l'oxigen (O<sub>2</sub>) present en l'aire, encara que també ho poden fer altres compostos químics com ho són el fluor (F<sub>2</sub>) o el clor (Cl<sub>2</sub>). En la reacció, el comburent actua com a oxidant del combustible mentre que ell mateix es redueix alliberant una major quantitat d'energia que l'aportada (reacció exotèrmica) que provoca la reacció en cadena que fa que el foc es propagui, originant així l'incendi.

L'equació química de la combustió d'un hidrocarbur tipus amb oxigen com a comburent és aquesta:



De tipus de combustions també n'hi ha de diversos tipus depenent de com es produeixi:

- Completa: combustible i comburent es troben en la proporció necessària per a que un cop finalitzada la reacció no existeixi la presència de substàncies combustibles en els productes de la reacció.
- Incompleta: succeeix quan no s'arriba al nivell màxim d'oxidació del combustible i no s'arriba a cremar del tot i apareixen restes de material combustible en els gasos de la reacció (aparició del fum).
- Estequiomètrica: amb la proporció mínima d'oxigen per a que no apareguin ni combustibles ni oxigen en els gasos de la reacció.
- Amb excés d'aire: en definitiva, excés de comburent per fer reaccionar completament el combustible.
- Amb defecte: un tipus de reacció incompleta en el que el comburent es escàs i comencen a aparèixer substàncies combustibles encara per cremar que per la calor es troben en els gasos de la reacció.

## 1.2. Classificació dels materials de construcció davant la seva reacció i resistència al foc

Per determinar el comportament dels materials de construcció segons la seva reacció al foc, s'han establert una normativa que estableix quins materials son aptes per a la construcció dependent de l'ús que se'n doni. El 2004 es va publicar la euro-classe de reacció i resistència al foc per als productes i elements constructius UNE-EN 13501-1. No s'entrarà en molt detall però si a grans trets quins tipus de classificació s'hi poden trobar.

### Segons la seva reacció (combustible o no):

**A1:** No Combustible. Sense contribució en grau màxim al foc

**A2:** No Combustible. Sense contribució en grau menor al foc

**B:** Combustible. Contribució molt limitada al foc

**C:** Combustible. Contribució limitada al foc

**D:** Combustible. Contribució mitja al foc

**E:** Combustible. Contribució alta al foc

**F:** Sense classificar

### Segons la generació de fums i la seva opacitat:

**s1:** Producció baixa de fums

**s2:** Producció mitja de fums

**s3:** Producció alta de fums

### Indicadors addicionals de caiguda de gotes/partícules:

**d0:** No es produeixen gotes/partícules

**d1:** Caiguda de gotes/partícules no inflamades

**d2:** Caiguda de gotes/partícules inflamades



D'aquesta manera es pot denominar un producte segons si contribueix o no a la combustió ( $A \rightarrow F$ ), la opacitat dels fums generats durant la combustió ( $s_1, s_2, s_3$ ) i si es desprenen gotes o partícules inflamables ( $d_0, d_1, d_2$ ). Un exemple d'un material que tingui una contribució mitja al foc, tingui una alta producció de fums i desprengui gotes o partícules no inflamables seria, segons la nomenclatura de la euro-classe: D-s3, d1. Així doncs, el material més òptim segons aquesta classificació seria un A1-s1,d0.

Pel que fa a la resistència al foc del materials, la norma UNE-EN 13501-2 també estableix una classificació segons el temps que triguen en perdre les propietats següents:

**R:** Capacitat portant (resistance)

**E:** Integritat (integrity)

**I:** Aïllament (Insulation)

Així doncs, es poden crear les següents classes en funció del paper que juga el material en l'edifici:

**R(t):** Temps que manté la estabilitat davant el foc o capacitat portant

**RE(t):** Temps que manté la estabilitat i al integritat davant el foc i els gasos calents

**REI(t):** Temps que manté la estabilitat, al integritat i l'aïllament tèrmic

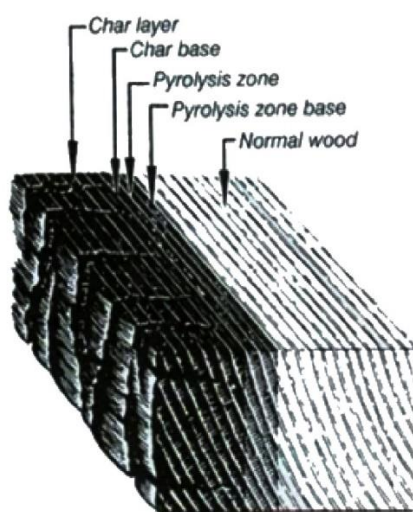
També es contemplen altres qualificacions per a alguns casos en concret que es precisin propietats més adequades com per exemple: la radiació (W), acció mecànica (M), tancament automàtic (C), estanqueïtat al pas del fum (S), continuïtat de l'alimentació elèctrica (P o HP), resistència a la combustió del sutge (G), la funcionalitat dels extractors tant mecànics com passius de fum i calor (F i B respectivament).

### 1.3. Fusta com a material combustible

La fusta, al tractar-se d'un material d'origen orgànic, hom pot pensar que el seu comportament davant el foc és més aviat negatiu però la realitat és que ofereix unes propietats més que decents en comparació a altres materials combustibles emprats en la construcció. Apart, però, també ofereix unes propietats tèrmiques, mecàniques i acústiques excepcionals, molt ben valorades per al confort i benestar personal a l'interior de l'edifici. Està constituïda fonamentalment per cel·lulosa (44%) i lignina. Segons el tipus de fusta que es tracti, les temperatures d'ignició o la facilitat que tenen per inflamar-

se són més altes o més baixes. Les fustes que tenen una densitat més alta, com el roure o l'auró, tenen la temperatura d'ignició més elevada. Genèricament, però, aquesta es situa al voltant dels 300°C.

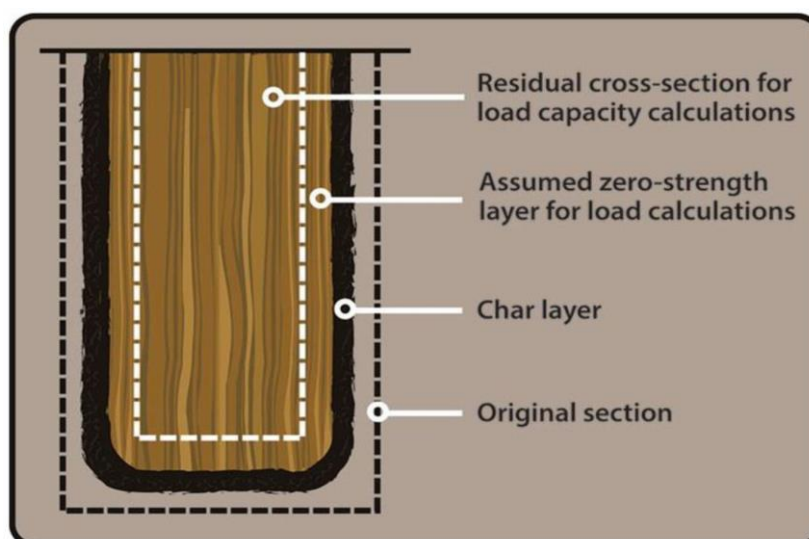
A aproximadament 100°C, la fusta experimenta un procés de dessecament provocat per la evaporació de l'aigua en el seu interior, i comença a guanyar resistència. Fins als 275°C, es comencen a desprendre gasos provinents de la piròlisis de la fusta com ho són el monòxid i diòxid de carboni ( $\text{CO}$  i  $\text{CO}_2$ ). És en aquest punt on es comença a produir la reacció exotèrmica, el  $\text{CO}_2$  disminueix en proporció i comencen a aparèixer els hidrocarburs. Per a l'ull humà, el que s'observa és com es forma una capa superficial carbonitzada, en molts casos, de colors foscos. Més enllà dels 450°C, els hidrocarburs ja es troben en fase gasosa i la resta de material carbonitzat ja no precisa d'una aportació exterior de calor per a mantenir la combustió, assolint així la reacció en cadena. Finalment, la part central del material, queda protegida per aquesta capa de carbó i queda totalment intacta (figura 1).



**Figura 1. Procés de carbonització de la fusta. Font: M<sup>a</sup> Dolors Mainar, 2016**

La capa carbonitzada té una capacitat aïllant sis vegades superior a la de la fusta sense cremar, això fa que la part interior trigui molt més a cremar i mantingui les propietats mecàniques durant més temps.

Per poder explicar de manera teòrica el comportament de la fusta davant el foc es posa per exemple que es comença a cremar una biga que suporta el pes d'un forjat. La biga, al tractar-se d'un element estructural, s'ha calculat per a que la seva secció suporti un coeficient de seguretat extra, amb la qual cosa la secció mínima (secció eficaç) per a que la fusta pugui suportar el pes del forjat és menor. Al carbonitzar-se una capa inicial, provoca que el foc penetri més lentament al seu interior, però la secció residual encara és major a la eficaç, i, per tant, la biga conservarà la càrrega portant més temps. Cal dir també que la secció carbonitzada té una capacitat portant molt menor a la de la fusta sense cremar i per això, en el seu càlcul, es pot negligir. En la figura 2 es pot observar de manera més gràfica les seccions que entren en el càlcul estructural de l'evolució de la combustió de la biga.



**Figura 2. Les diferents seccions d'una biga en el procés d'una combustió**

**Font: M<sup>a</sup> Dolors Mainar, 2016**

Es tracta d'un dels materials més polivalents en la construcció ja que es pot emprar per a elements estructurals (cobertes, forjats i parets), fusteries, terres, mobles i revestiments. Aquest últim és el que comporta més problemes ja que de la manera que es treballa per a la forma final, resulta la més desfavorable: llistons o panells d'un gruix petit afavoreix la ràpida combustió i, en definitiva, una alta contribució a l'incendi. És per això que la fusta emprada en els revestiments, té una qualificació de D-s2,d0 segons la euro-classe definida en l'apartat 1.2, és a dir, una contribució al foc mitja (D), amb una generació mitja de fums (s2), i sense desprendiment de gotes o partícules (d0).

Per a millorar el comportament de la fusta davant el foc, sovint, aquesta és sotmesa a tractaments que millorin el seu rendiment. A continuació es defineixen els més comuns segons si són en profunditat o superficials.

### **En profunditat**

**Protectors ignífugs basats en sals simples:** ús idoni per a elements interiors com parquets i revestiments.

**Protectors ignífugs basats en sistemes semi-complexes resistents a la humitat:** Protegeix la fusta d'humitats elevades així com variacions d'aquesta, encara que el seu ús és òptim quan els elements estan protegits dels efectes climàtics.

**Protectors ignífugs basats en sistemes de resines polimèriques:** Emprades tant per a interiors com a exteriors.

### **Superficials**

#### **Pintures i vernissos**

**Intumescent:** recobriments superficials que davant altes temperatures, pateixen un augment desmesurat del seu volum, protegint així la fusta de les flames i sufocant el foc.

**No intumescent:** recobriments superficials que davant altes temperatures, generen una interfase química aïllant que protegeix la fusta.

## **1.4. Fases de l'incendi en l'edificació**

Els tipus d'incendi que interessa descriure per aquesta investigació són aquells que succeeixen a l'interior d'un compartiment. L'origen d'aquest té múltiples causes les quals no són rellevants per al seu estudi. El que importa realment és el desenvolupament de l'incendi ja que hi ha nombroses variables que sí afecten. Fonamentalment dependrà de les característiques del recinte on es desenvolupa l'incendi, la ventilació d'aquest, la

distribució dels elements (finestres, mobiliari, portes, etc) i els materials combustibles que puguin cremar.

Encara de que es tracti d'un procés molt aleatori, donat que la quantitat de variables que afecten a l'incendi pot jugar un paper decisiu en qualsevol moment, s'han pogut establir 5 fases que descriuen l'evolució que pateix el foc. Val a dir que no hi ha un temps fix per fase ja que, com s'ha comentat, cada incendi és únic per les circumstàncies que l'envolten. Tot i això, les 5 fases són les següents:

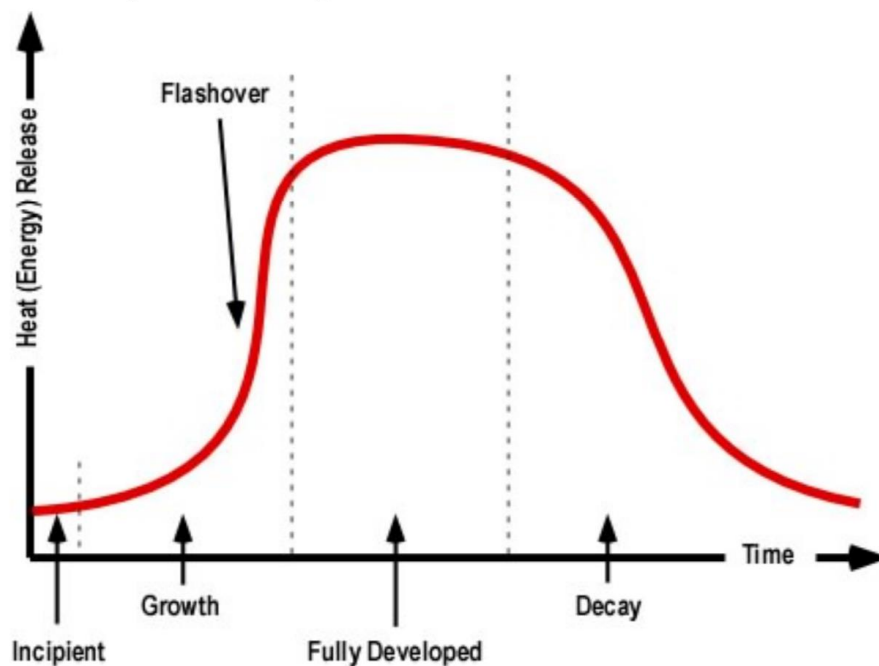


Figura 3 Desenvolupament d'incendis en un compartiment. Font: Giraldo 2012

- **Fase d'ignició:** temps en el qual comença a cremar-se el primer element originant un foc. Per a que succeeixi, és necessari que les condicions per a que es produeixi la combustió siguin bones, és a dir, un material combustible amb la proporció de comburent necessària per iniciar la reacció en cadena. El combustible, en aquest punt, juga un paper molt important ja que depenent de l'energia d'activació que tingui, pot fer que l'incendi es desenvolupi amb molta rapidesa i no doni temps a reaccionar, o per contra, sigui un material amb una energia més alta i la reacció en cadena sigui més lenta. És en aquest moment quan l'incendi es podria controlar millor ja que la temperatura del recinte i de les flames són baixes, falta però, que es pugui detectar a temps. En aquesta fase la concentració d'oxigen és sobradament elevada i això dona nom a que la combustió està "controlada pel combustible".

- **Fase de creixement:** El foc, un cop encès, comença a créixer i les flames, per efecte de la flotabilitat, guanyen altura. Els gasos calents fruits de la combustió, pugen i els més densos baixen per diferència de densitat en un flux permanent ja que cada cop les flames són més calentes (també anomenat plomall de l'incendi). Es comencen a generar fums tant tòxics com inerts però que igualment són molt perillosos per a les persones ja que augmenten molt el risc d'ofegar-se. Com s'ha comentat en la fase d'ignició, la naturalesa del material provoca que la fase de creixement sigui més o menys ràpida. El fet de que hi hagi un flux renovador d'aire gràcies a les ventilacions, afavoreix el ràpid creixement de les flames ja que és un aportació constant de comburent. Durant aquesta fase s'arriba un punt on es poden considerar dues capes: la capa superior plena de fums calents i una capa inferior amb gasos més freds i amb oxigen encara dissolt en ella. Progressivament la capa superior es va fent cada cop més calenta i gran, en detriment de la capa inferior fins al punt en que el plomall de les flames pot ocupar tot el recinte on s'està produint l'incendi. Arriba el moment en que els gasos que es troben al sostre estan tant calents que irradien calor cap a la resta d'elements combustibles provocant que s'inflamen simultàniament donant lloc a la següent fase (Klopovivc, 1998).
- **Flashover:** o combustió sobtada, és la fase més ràpida i alhora la més perillosa ja que es passa de tenir un foc localitzat a tenir un foc generalitzat a tot el recinte, cremant, així, tot el que sigui combustible. Normalment, es pot caracteritzar el *flashover* perquè la temperatura de la sala ronda els 600°C, el flux de calor en el terra del recinte ronda els 20kW/m<sup>2</sup> o, descriptivament, les flames trenquen els vidres i es poden observar des de l'exterior (M.P. Giraldo, 2012: 170-171). En aquest punt l'incendi passa a ser controlat per la quantitat d'oxigen. El fet de que es trenquin els vidres o s'obrin portes genera una renovació de l'aire, ple d'oxigen que fa que totes les superfícies combustibles que anteriorment no podien cremar per falta de comburent, ara ho facin de cop degut a les altes temperatures a les quals es troben.
- **Fase de desenvolupament total de l'incendi:** En aquesta etapa, tots els materials cremen simultàniament i la seva durada depèn únicament de la quantitat de combustible. Tots els paràmetres importants que es tenen en compte

en un incendi, assoleixen el valor més alt possible en aquesta fase, com per exemple: la velocitat d'alliberació de calor o potència calorífica alliberada per el combustible (en anglès Heat Rate Release Per Unit Area o simplement HRRPUA), la temperatura, la generació de calor, la velocitat de combustió o, la que per a aquesta investigació és probablement la més important, la propagació de les flames cap a l'exterior del recinte (en aquest cas, la façana).

- **Fase de declivi:** Una vegada es consumeix el combustible, comença a haver-hi un progressiu decreixement de l'incendi fins que s'extingeix.

## 1.5. Propagació vertical d'incendis per la façana

Un incendi es comença a propagar cap a les plantes superiors un cop ben entrada la fase del *post-flashover*. La propagació vertical es pot dur a terme a través de l'interior o l'exterior de l'edifici i planteja certs inconvenients pel que fa a la velocitat d'avançament de les flames i dels fums.

Encara que no sigui el nostre objecte d'estudi, es farà una breu descripció de quins mecanismes de propagació té el foc per propagar-se per l'interior de l'edifici. Per molt ben compartimentat que pugui estar, hi ha elements que trenquen aquesta separació pel fet de que són necessàries, com per exemple els conductes de l'aire climatitzat, canonades o ranures del cablejat elèctric. Normalment aquestes són les vies més usals per on es propaga l'incendi cap a compartiments contigus a través de les parets o superiors a través del forjat. És per això que cada instal·lació hauria d'anar equipada amb elements ignífugs per a cobrir els forats per on poden avançar les flames. En el cas dels conductes d'aire climatitzat, convindrien anar equipats amb sistemes de protecció activa per a que es bloquegin quan es detecta un incendi. Una altra via de propagació que és clau en la ràpida propagació d'un incendi, és el forat de les escales o d'ascensors, ja que comuniquen directament el pis on s'està produint l'incendi, amb la resta de pisos. Per aquesta raó, aquests elements han d'anar protegits amb parets reforçades i més resistents davant l'efecte de les flames. En alguns casos, si la normativa ho requereix, les caixes d'escales poden anar sobre-pressuritzades ja que al tractar-se d'una via d'evacuació en cas d'incendi, el personal a l'interior de l'edifici la utilitzarà.

Pel que fa a la propagació exterior l'únic element és la façana i, alhora, suposa una de les vies més ràpides que té el foc per arribar a cotes superiors i provocar importants danys estructurals importants a l'edifici. Les causes per les quals es pugui propagar un incendi a través de la façana són tres:

- Foc provinent de l'exterior de l'edifici, ja sigui perquè un incendi estigui cremant un altre edifici proper i les brases més la radiació que es desprenen iniciïn un altre foc a la façana del nostre cas d'estudi. Una zona vegetal en flames també pot propagar-se i afectar l'edifici.
- Foc provinent d'un element exterior urbà com per exemple un contenidor de brossa, mobles, etc. O simplement un vehicle en flames.
- Foc originat en un compartiment de l'edifici amb alguna paret coincidint amb la façana per on s'escapa el foc a través de les finestres. És el cas escollit per realitzar l'estudi ja que és el cas en que posa en més risc a les persones i, estadísticament parlant, el més probable.

Les condicions en la zona exterior són favorables a la propagació donada la gran flotabilitat del plomall de l'incendi. L'aportació inesgotable d'oxigen i la verticalitat de la façana són factors que afavoreixen la propagació, però si els materials dels quals està feta la façana són combustibles, les conseqüències encara són pitjors. Altres factors que afavoreixen aquesta propagació poden ser la càrrega del foc, les configuracions geomètriques tant de la façana com les finestres i les condicions de ventilació. Pel que fa a les condicions climatològiques, la temperatura, la humitat o el vent, també són factors que influeixen en la propagació.

En general els incendis originats en recintes interiors no arriben a cremar completament el material combustible ja que l'absència d'oxigen, la limita. És per això que una part del material encara per cremar està barrejat amb els fums calents que un cop s'aconsegueixen escapar a l'exterior a través de finestres o ventilacions, s'inflamen.

Així doncs, la propagació de les flames a través de la façana es poden produir, fonamentalment, de quatre maneres que es poden observar de manera gràfica en la figura 3:

- Propagació a través de finestres, anomenat efecte *leap-frog* (salt de granota). (a)
- Propagació a través de la cavitat entre l'encreuament del forjat i la façana. (b)
- Propagació a través de les càmeres ventilades. (c)



- Propagació a través dels revestiments combustibles. (d)

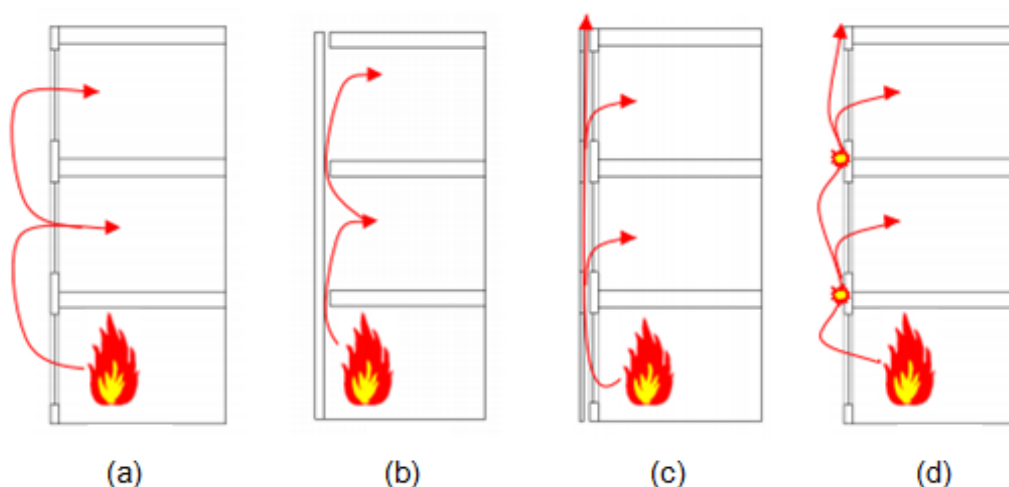


Figura 4. Esquema de les vies de propagació del foc a través de les façanes. Font: Giraldo 2012

Donat que aquesta investigació es centra en el comportament de les flames en els casos (a) i (d), és a dir, façanes recobertes d'un material combustible com ho és la fusta i observar l'efecte del *leap-frog*.

### 1.5.1. Propagació a través de les finestres o efecte *leap-frog*

Considerada una de les formes propagacions més perilloses existents, aquest efecte no té en compte si es tracta d'una façana revestida de materials combustibles o no. La propagació a través de finestres és la capacitat que té l'incendi per saltar de forma ascendent i seqüencial a través de les finestres d'un edifici. Si les flames i el plomall projectat a través de les finestres tenen suficient intensitat com per arribar a trencar les del pis superior, augmenta molt el risc de generar un altre focus en el pis superior i així successivament.

És per això que objectes combustibles tals com cortines, mobiliari o materials tèxtils, situats a prop d'una finestra, augmenten molt la probabilitat de que es generi un segon focus si s'està produint un incendi declarat en alguns dels pisos inferiors.

### **1.5.2. Propagació a través dels revestiments combustibles**

Els revestiments combustibles poden ser els causants de la ràpida propagació de l'incendi i tendeixen a resultar en flames molt intenses i de gran radiació. Apart, les propietats químiques dels materials són importants degut a la generació de fums tòxics i desprendiments de partícules o gotes inflamables durant la combustió.

L'escalfor dels fums comencen a escalfar el material que començar a pirolitzar abans no ha entrat en contacte amb les flames. Un cop el foc comença a cremar el material, aquest es propaga d'una forma més vertiginosa generant una gran radiació i velocitat en la flama, un dels majors riscos per als equips d'extinció al que s'enfronten. Altres riscos importants són els següents:

- La propagació cap a altres edificis degut a que a la radiació de l'incendi se li ha de sumar la de l'incendi generat per la façana.
- En alguns casos de panells de revestiment mixtes, tenen un nucli d'aïllant combustible que quan entra en contacte amb les flames després de col·lapsar la capa incombustible, es genera una combustió interior que es propaga ràpidament a través del nucli.

### **1.6. Normativa existent sobre elements de protecció passius (ràfecs)**

La present investigació també es centra en l'estudi dels elements de protecció passius en la façana. Actualment, la normativa sobre la propagació vertical de l'incendi és més aviat limitada. Segons el CTE, la distància mínima entre obertures d'un recinte a un altre més alt, és de només 1m (figura 5). En cas de que existeixin sortints o ràfecs, aquesta distància podrà ser menor en la mateixa distància que el ràfec surti cap a l'exterior (figura 6) El material de la façana haurà de tenir una resistència al foc EI60, és a dir, hauran de garantir una integritat i un aïllament durant 60 minuts en cas d'incendi.

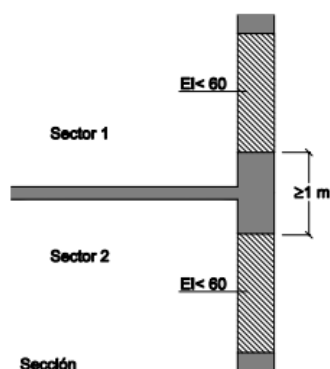


Figura 5. Detall de la distància mínima entre obertures sense ràfec. Font: Codi Tècnic Espanyol sobre la seguretat en cas d'incendi

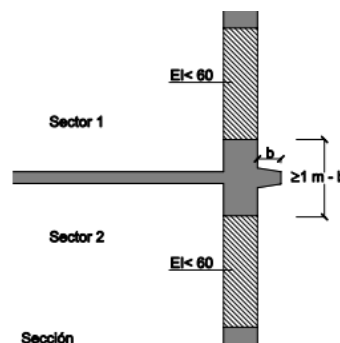


Figura 6. Detall de la distància mínima entre obertures amb ràfec. Font: Codi Tècnic Espanyol sobre la seguretat en cas d'incendi

Pel que fa a la reactivitat dels materials que ocupen la façana, si ocupen més del 10% de la superfície del acabat exterior de la façana, haurà de ser classe B-s3,d2 fins a una alçada de 3,5m.

Com es pot observar, no existeix una informació molt detallada de les dimensions dels alers depenent de les classes de reactivitat davant el foc del material.

Respecte a les mesures més completes per a limitar la propagació vertical del foc mitjançant la configuració geomètrica de les façanes es troben a Bèlgica, França, Suècia i Noruega. Allà contemplen l'ús de franges verticals de material incombustible com a mesura extra per evitar la propagació vertical de les flames. La belga i francesa estipulen que aquesta sigui també de 1m encara que és igual si es troba en vertical o en forma de ràfec. La sueca es limita a 1,2m en vertical. El mateix valor és emprat per la noruega però amb la diferència que també es pot aplicar com en la belga o francesa.

## 1.7. Casos d'estudi en relació amb la propagació exterior a través de la façana

En l'actualitat, s'han publicat nombrosos articles relacionats amb la propagació d'incendis en façana tant en el Japó com a la Xina. Cal destacar *Experimental study on fire propagation over combustible exterior facades* realitzat per Y. Nishio, H. Yoshioka, T. Noguchi, T. Ando i M. Tamura (Nishio, 2013), monitoritzant façanes de diferents

materials combustibles sotmeses a incendis per veure el seu comportament davant el foc. Els mateixos autors, dos anys més tard, publiquen *Fire Spread Caused by Combustible Facades in Japan* (Nishio, 2015), un altre estudi sobre la propagació del foc en façanes combustibles i el seu comportament amb els edificis adjacents suposant un escenari d'una àrea residencial altament densa típica del país nipó.

A Xina, L. Peng, Z. Ni i X. Huang també publiquen *Review on the fire safety of exterior wall claddings in high-rise buildings in China*, un estudi sobre el comportament dels revestiments dels edificis en altura davant el foc (Peng, 2013). L'objectiu de és establir una norma per a l'altura de l'edifici en funció del material que estigui fet el revestiment que incorpori.

A Europa, E. Guillaume, T. Fateh, R. Schillinger, R. Chiva i S. Ukleja publiquen *Study of fire behaviour of facade mock-ups equipped with aluminium composite material-based claddings, using intermediate-scale test method* (Guillaume, 2018). En aquest utilitzen el mètode d'extrapolació del comportament d'un incendi en una maqueta a les dimensions reals d'un edifici. Els assajos són realitzats en maquetes de 2,5 metres que són monitoritzades amb termoparells. De les façanes fetes de diferents materials compostos basats en alumini, s'obtenen les dades que després recreen a escala real fent una estimació.

Pel que fa a estudis realitzats amb mètodes numèrics com és dels elements finits, cal destacar la tesis doctoral de M. Del Pilar Giraldo *Evaluación del comportamiento del fuego y protección contra incendios en diversas tipologías de fachadas*, on, mitjançant el mateix software de simulació que s'emprarà en aquest estudi, realitza comparatives de la propagació de l'incendi en diferents tipologies de façana (Giraldo, 2012).

Dintre del camp de les simulacions computacionals, també cal destacar l'article *Numerical study on fire response of glass facades in different installation forms*, realitzat per Y. Wang, Y. Wu, Q. Wang, K. M. Liew, H. Chen, J. Sun i L. He (Wang, 2014) a la Xina. En aquest cas, però, l'estudi es centra en el comportament dels diferents tipus de façanes en el les quals el vidre és el material principal. La metodologia que es segueix és la mateixa que es realitzarà en aquesta investigació: es compararan els resultats obtinguts en els diferents escenaris simulats per extraure unes conclusions. Cal tenir en compte que les magnituds i variables que són objecte d'estudi no seran les mateixes ja que al tractar-se d'un material incombustible la causa principal de la propagació no serà la combustió del material. Per posar exemples, l'equip xinès té en compte les fractures

del vidre degut a les diferències de temperatura, la distribució de tensions, el moment en el qual es produeix la fractura i com varien tots aquests paràmetres en funció de les condicions de contorn a les quals està sotmès el material (tipus de finestres, panells, etc.). De totes maneres, el model computacional per a la mecànica de fluids planteja certs dubtes davant seva la fiabilitat en quant a resultats obtinguts. Els científics J. Anderson, L. Boström, R. J. McNamee i B. Milovanovic publiquen un estudi comparatiu anomenat *Uncertainties in façade fire tests – measurements and modeling* (Anderson 2016) presentat al 2<sup>nd</sup> *International Seminar for Safety of Facades* a Suècia el mateix any. En aquest estudi es realitzen assajos a gran escala seguint dues metodologies: la SP FIRE 105, la qual descriu la norma sueca, i la BS 8414-1, la qual descriu la norma britànica que posteriorment han adoptat altres països com Àustria o els Emirats Àrabs. Posteriorment es modelen els mateixos escenaris fent servir el mateix software per simular-los una vegada darrere l'altre i estudiar així la repetibilitat del programa. La comparativa, segons els autors, els permet trobar, matemàticament, un rang de valors al llarg del temps prou ajustat als valors obtinguts en els assajos reals. Els valors de temperatura i potència calorífica després de l'incendi s'aproximen i poden oferir una bona visió temporal de l'evolució de l'incendi. Tot i la constant evolució dels models numèrics i la seva optimització, el nivell assolit en l'actualitat permet, no només emprar les simulacions per normativitzar la protecció contra incendis, sinó tenir present aquesta protecció en la mateixa fase de disseny de l'edifici.

Pel que fa a la creixent demanda d'ús de materials més renovables en la construcció, la fusta és un dels principals que es troba en el punt de mira pel seu comportament davant el foc. Es tracta d'un material que ofereix molt bones propietats per aconseguir un bon aïllament, tant acústic com tèrmic, sobretot en climes freds, i estèticament pot resultar una bona elecció com a revestiment per a la façana. És per això que els estudis realitzats fins al moment provenen dels països nòrdics, on la fusta ha sigut un dels materials més bàsics per a la construcció donada la proximitat i la seva fàcil transformació en material d'obra. T. Hakkarainen i T. Oksanen van publicar *Fire safety assessment of wooden facades* (Hakkarainen, 2002), una avaluació sobre la seguretat contra incendis en façanes de fusta tenint com a escenaris una font d'ignició relativament petita fóra de l'edifici i un incendi interior en un dels compartiments amb diferents materials en el revestiment, tractaments superficials i estructurals.

## **2. FASE EXPERIMENTAL**

### **2.1. Introducció a la simulació d'incendis**

Des de fa 30 anys, un cop superada la implementació de mètodes de càlcul com el dels elements finits o diferències finites en el món de la computació, el modelatge i la simulació han evolucionat per donar respostes molt aproximada a fenòmens que no són desitjats o molt costosos de comprendre a la perfecció per a l'home. L'avenç científic ha permès explorar de manera controlada les interaccions que succeeixen entre els elements que componen el sistema que s'ha definit.

Històricament, la manera de calcular els sistemes dinàmics s'han basat en els models d'equacions diferencials, ordinàries i parcials. Aquestes han donat molt bones prestacions a l'hora de reproduir fenòmens que succeeixen a la realitat, però sovint, tendeixen a ser molt tediosos donades la gran quantitat i complexitat de càlculs que es realitzen si es volen representar al 100% de la realitat. Val a dir, però, que en àmbits més senzills per a la seva representació són més que suficients per a la simulació. Aquests àmbits podrien ser el món de la producció i línies de muntatge, el control del trànsit (tant aeri com terrestre) o xarxes de comunicació.

Per donar resposta a aquests sistemes tant tediosos de simular, a finals dels anys 90 s'impulsa una teoria més genèrica entorn a aquesta tècnica d'investigació per convertir-la en més efectiva. Paral·lelament, la informàtica pateix una revolució amb l'entrada de nous llenguatges de programació i la de l'ordinador personal (PC). Camps com el de l'aeronàutica, l'electrònica, processos industrials, la biologia, la medicina, la climatologia, l'enginyeria o l'arquitectura que es regeixen per models molt més complexos, en l'actualitat es poden inclús arribar a provar conceptes que en la realitat són impossibles o inviables. Aquest fet reporta un benefici a tots els nivells: econòmics (no es comparable el cost d'un assaig real a una simulació com que les que es reproduïxen en aquesta investigació), adquisició de coneixements (un pilot pot començar a adquirir experiència en un simulador abans de portar un avió) o prevenció de riscos (models climatològics que fan una previsió dels canvis meteorològics més perillosos com els huracans o les tempestes tropicals i alerten amb certa antelació).

És per això que el model escollit juga un paper molt important en la simulació ja que, actua com a motor per a reproduir en el temps els sistemes, fenòmens o processos. Posteriorment es podrà obtenir una representació conceptual o física clara per extreure

les conclusions pertinents. Els models de simulació es creen amb l'objectiu d'explorar i predir el comportament de l'objecte d'estudi sota certes condicions. L'efectivitat per arribar conclusions rellevants dependrà de la selecció de factors que afectin realment el tema que es vulgui tractar, d'una bona interacció entre els elements (si n'hi ha més d'un) i les variables escollides. Hi ha fonamentalment dos mètodes per a modelar sistemes complexos:

- Mètode analític: emprat per a resoldre sistemes més simples ja que al estar basats en la racionalització, la complexitat de càlculs és major però s'obtenen solucions més generalitzades. En cas de que es volguessin trobar solucions més particulars, només caldria afegir o fixar variables.
- Simulació mitjançant la computació: Per tal de solucionar els problemes de càlculs feixucs, s'obtenen aproximacions a partir d'un model genèric el qual finalitza en solucions particulars al model. Aquest fet permet simplificar un model per a optimitzar el temps que es triga en trobar una solució.

Per donar resposta a creixent demanda de softwares més senzills, en l'actualitat s'han creat programes que directament generen el codi que el propi simulador fa servir per dur a terme la simulació. Aquest fet ve donat per la generalització massiva de l'ordinador personal i la conseqüent aparició d'usuaris inexperts en el estricte camp de la informàtica i la simulació computacional però que en canvi sí que ho són en el camp de la dinàmica de fluids, per exemple. Aquests programaris són complementaris al programa de simulació i faciliten molt la creació del sistema a estudiar, així com el temps emprat. De la mateixa manera que existeixen softwares per a la introducció de dades (inputs), també n'hi ha per a la visualització dels resultats (outputs), els quals permeten observar el transcurs de la simulació, resultats finals i com han anat variant, gràfiques i inclús permeten enregistrar la simulació.

En els últims vint anys la simulació computacional ha impactat significativament en les branques de l'enginyeria i la física. La dinàmica de fluids és una de les que més ha recorregut a solucions numèriques mitjançant la iteració i el càlcul analític, donant com a resultat llargs processos de càlculs. És per això que el desenvolupament de softwares que permeten implementar les equacions que regeixen els fenòmens que succeeixen en aquest camp a models numèrics computables, ha facilitat molt la tasca i ha permès explorar sistemes nous abans inclús de que siguin creats per assajar-los (prototips). Aquest branca anomenada dinàmica computacional de fluids o CFD (de l'anglès Computational Fluid Dynamics), es basa en aproximacions numèriques de les equacions

físiques aplicades a la dinàmica de fluids. Això ha permès explorar fenòmens tant complexos com el foc, tema central de l'estudi, i com interacciona en diferents situacions. Cap a la dècada dels 80 sorgeixen els primers Models de Simulació Computacional d'Incendis (MSCI) ajudats dels estudis previs realitzats amb la CFD, fins al punt de crear softwares específics només per a incendis els quals han sigut molt útils per a entendre el seu comportament tant a petita com a gran escala i en la creació de mesures de prevenció. Un d'aquests softwares serà el emprat en aquest estudi.

## 2.2. Mètodes de simulació d'incendis

L'incendi és un procés molt complex d'entendre ja que combina coneixements de la dinàmica de fluids i de la transmissió de calor de manera física com química. Com ja s'ha explicat en el apartat 2.1, existeixen dos mètodes per estudiar el transcurs d'un incendi: analíticament i fent ús de models numèrics mitjançant la computació.

Pel que fa als models analítics, es poden fer servir corbes nominals ISO i les corbes paramètriques temperatura-temps (models més genèrics) que permeten obtenir de manera ràpida i senzilla resultats aproximats encara que menys fiables que els obtinguts mitjançant algun MSCI.

Els MSCI poden reportar una gran quantitat de valors molt més específics per al cas que es vulgui estudiar (models concrets per a cada cas). Tot i això, les dades que s'obtenen mai s'han d'interpretar com una còpia del que succeiria a la realitat ja que en un incendi hi ha moltíssimes variables que ni tant sols podem controlar-les (i és per això que en la realitat són tant difícils d'abordar a l'hora d'extingir-los). Per tant, els resultats que se n'obtinguin només han de servir com a una orientació i no com una realitat.

Una altre divisió dels models que es pot fer dels models és la següent:

- **Aleatoris:** són aquells que admeten successos variables o imprevistos en un incendi. Un cas on són útils són en els incendis forestals, on no tots els processos físics són rellevants, com per exemple l'energia d'activació de la combustió per a cada tronc d'arbre, però si ho és que de manera sobtada comenci a bufar el vent en una certa direcció i ajudi a controlar-lo. Es basen més en dades estadístiques que en les pròpies lleis que regeixen la dinàmica de fluids o la transmissió de calor. Tot i això, per a incendis a escales més petites, s'han



fet estudis per transformar les equacions de Navier-Stokes i de la transmissió de calor, en senzilles equacions que es poden inclús resoldre de manera manual. Aquestes permeten calcular, d'una manera estimada, variables típiques d'un incendi com ho són l'altura de les flames, temperatures y velocitats dels gasos del plomall, el descens de la capa de fums, el temps transcorregut fins al *flashover*, etc.

- **Deterministes:** Aquests models es basen en un escenari delimitat i ben definit per garantir que es compleixen les equacions de la dinàmica del foc. Això implica que s'ha de preparar a consciència totes les variables que es volen estudiar i fàcilment s'aconsegueixi l'objectiu de la simulació després de nombrosos intents. Dintre d'aquests models, també se'n pot fer una classificació de dos tipus: models de zona i models de camp.

### 2.2.1. Models de zona

Un model de zona és un programa computacional que simula el comportament d'un incendi a l'interior d'un recinte. Aquest recinte es discretitza en dues zones ideals o volums de control: una capa superior, formada per el fum i tots els gasos calents productes de la combustió, i una capa inferior, composta per l'aire fred i combustible. A cada capa es considera que la concentració de gasos i la temperatura és uniforme. Les dues capes estan dividides per un pla neutre que es mou de manera vertical conforme evoluciona l'incendi. Generalment la capa superior es fa més gran, fent restar volum a la inferior fins que (en certs casos) ocupa tot el volum del recinte.

El model més bàsic que es pot trobar, és el d'un recinte tancat on es conserva la massa i l'energia i els intercanvis de calor i fluxos de fum entre capes. En general, però, es consideren recintes amb apertures ventilacions, finestres o portes que aporten un caudal d'aire renovador al sistema, tant tèrmica com químicament. En aquest cas el sistema ja necessita més variables per poder fer una simulació que s'aproximi a la realitat. En la figura 8 es pot veure un clàssic cas on es veu perfectament definit el model de zones.

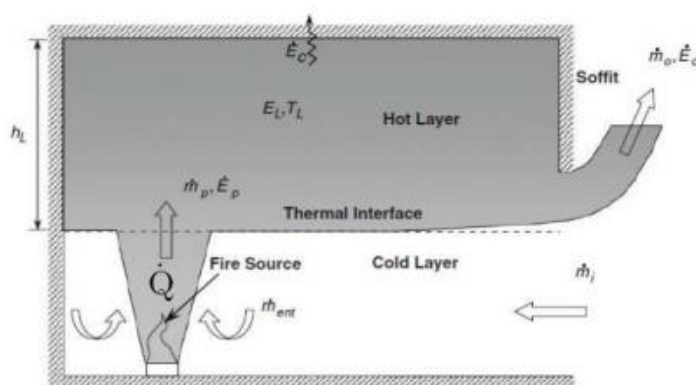
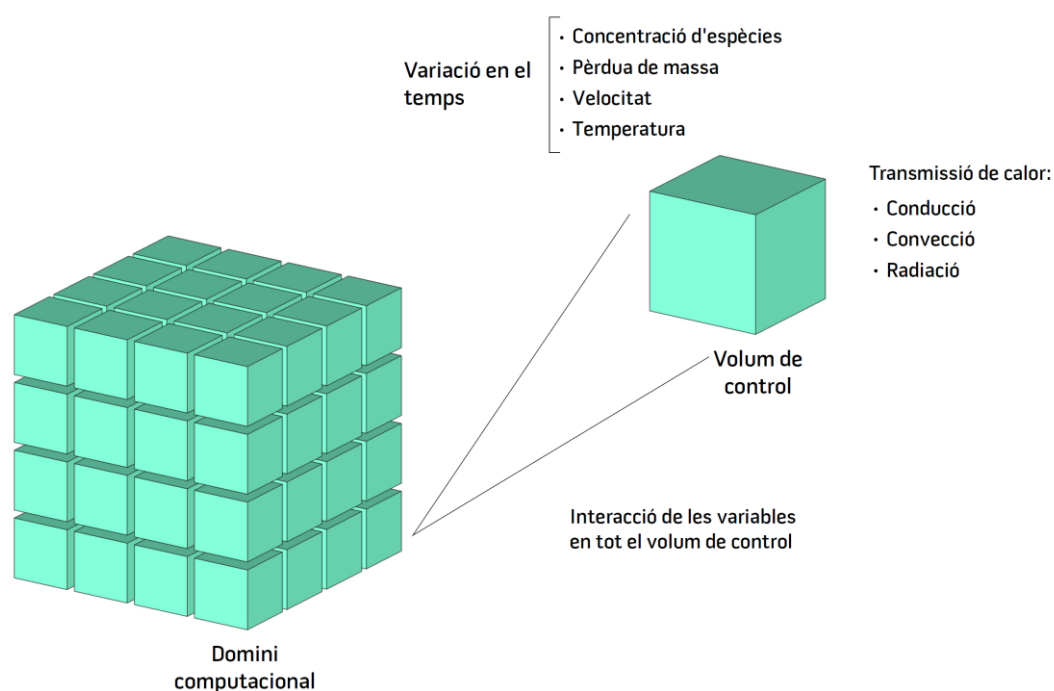


Figura 7. Exemple gràfic d'un model de dues zones. Font: Giraldo, 2012

Acostumen a requerir una poca demanda computacional a l'hora de realitzar la simulació, ja que les configuracions per les quals són útils, sempre solen ser simples i amb un nombre limitat d'hipòtesis. Aporten, sobretot, informació sobre l'evolució de la capa de fums al llarg del temps, les pèrdues de calor a través de les parets i obertures, així com les velocitats que assoleixen els gasos. Els models de zones més utilitzats són els següents: CFAST (NIST, EUA) i Ozone (*Department of Mechanical Material and Structure* de la Universitat de Lieja, Bèlgica). Altres programes són LAVENT (NIST, EUA), ASET o FISBA entre d'altres

### 2.2.2. Models de camp

Els models de camp també són coneguts amb el nom de CFD (*Computational Fluid Dynamics*) o models computacionals per a la dinàmica de fluids i es regeixen pels principis de la dinàmica de fluids. Si en el model de zona es discretitza el volum a estudiar en dues zones, en el de camp es divideix el cas en una malla tridimensional del volum que es requereixi. Cada una d'aquestes cel·les queda regida per les equacions diferencials que governen el sistema i les condicions de contorn. Dintre d'aquestes equacions hi trobem les de conservació de la massa i energia, moments i espècies. També es tenen en compte les que es relacionen amb la transmissió de calor, ja sigui per conducció, convecció o radiació i, finalment, el model químic que conforma la combustió (energies d'activació i alliberació).



**Figura 8. Esquema de la discretització d'un escenari basat en el de Giraldo, 2012**

Aquests models són molt més sofisticats ja que ofereixen una visió molt més detallada del que va succeint al llarg del temps en quasi qualsevol punt del cas d'estudi. El problema és que utilitzen mètodes numèrics com el de les diferències finites, volums finits o elements finits, que procedeixen a fer una quantitat de càlculs molt superior als models de zona. El fet que fa que sigui més feixuga de calcular la simulació és la quantitat de volums de control o cel·les que està compostat el cas d'estudi.

Per altra banda, aquest tipus de models permeten realitzar simulacions en casos amb geometries més complexes i proporcionen una informació molt més detallada de l'evolució de l'incendi. El qual planteja un altre problema com és el gran nombre d'escenaris possibles a considerar o el transport de la massa i l'energia.

Amb el temps, s'han anat creant i desenvolupant programes de simulació dins el camp de la dinàmica de fluids que resolen amb certa solvència problemes relacionats amb els fluids. L'exemple més conegut és el FLUENT, desenvolupat per l'empresa ANSYS (EUA) qui també ha creat diferents programaris per a altres variables físiques, com per exemple la distribució d'esforços estructurals. Hi ha programes que tenen paquets per a l'estudi del foc de manera més concreta. Els dos més coneguts són el JASMINE, desenvolupat al Regne Unit per FRS (*Fire Research Station*) i el FDS, desenvolupat als EUA per el NIST (*National Institute of Standards and Technology*). Altres programes són

CFX, SOFIE o ALOFT-FT. La majoria de CFD utilitzen models empírics per a la modelització de turbulències o models de grans remolins (LES) *Large Eddy Simulation*.

En l'actualitat aquests programes estan en continu desenvolupament i cada cop més incorporen més variables i paràmetres que també existeixen en la realitat per tal d'oferir un model el més robust possible. Per contra, cada cop s'hauran de tenir més variables controlades i en molts casos no és una tasca fàcil si l'objectiu és aconseguir una simulació igual a la realitat.

### **2.3. *Fire Dynamics Simulator***

Tota la fase experimental de la investigació s'ha dut a terme amb els models CFD, en concret amb el programa FDS, desenvolupat per el NIST, i calcula la densitat, velocitat, pressió i concentració d'espècies en cadascuna de les cel·les mitjançant les equacions de conservació de la massa, del moment (Navier-Stokes) i l'energia. En la figura 8 es mostren les equacions que regeixen el model de camp del FDS. Altres variables que també calcula són la temperatura en les superfícies sòlides, el flux de calor, la velocitat de combustió i la de pèrdua de material.

A més ofereix una llibreria amb una gran quantitat de materials per permet modelitzar el cas d'estudi amb un nombre de detalls prou gran. Una dada curiosa és que el codi amb el qual està programat és lliure (no el programa) amb l'objectiu de compartir el màxim coneixement possible entre els usuaris dedicats a la protecció contra incendis.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho u = 0$$

[a] Conservació de la massa

$$\frac{\partial \rho Y_i}{\partial t} + u \cdot \nabla \rho Y_i = -\rho Y_i \nabla \cdot u + \nabla \cdot \rho D_i \nabla Y_i + \dot{m}_i'''$$

[b] Conservació de les espècies

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u) + \nabla \cdot \rho u u = -\nabla p + \rho f_T + \nabla \cdot \tau_{ij}$$

[c] Conservació del moment (Navier-Stokes)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \nabla \cdot \rho h u = \frac{D_p}{D_i} + \dot{q}''' - \nabla \cdot q_r + \nabla \cdot k \nabla T + \nabla \cdot \sum_i h_i (\rho D)_i \nabla Y_i$$

[d] Conservació de l'energia

$$p_0 = R \rho T \sum_i \frac{Y_i}{M_i}$$

[e] Equació d'estat

Figura 9. Equacions que regeixen el model de camp del programa FDS

També s'ha utilitzat un programa complementari per construir els casos d'estudi: el Pyrosim. Aquest programari està especialment dissenyat per traduir el llenguatge informàtic que realment utilitza el simulador a quelcom més senzill i visual. Es tracta d'una interfície on l'usuari construeix el seu cas d'estudi com si literalment estigués fent una maqueta i disposa d'una gran quantitat de menús on s'especifiquen tant les propietats dels elements construïts com la geometria exacte que es desitja. També permet definir el dos tipus de càrrega de combustible: sòlids, com en aquest cas la fusta, o líquids com ho podria ser un hidrocarbur.

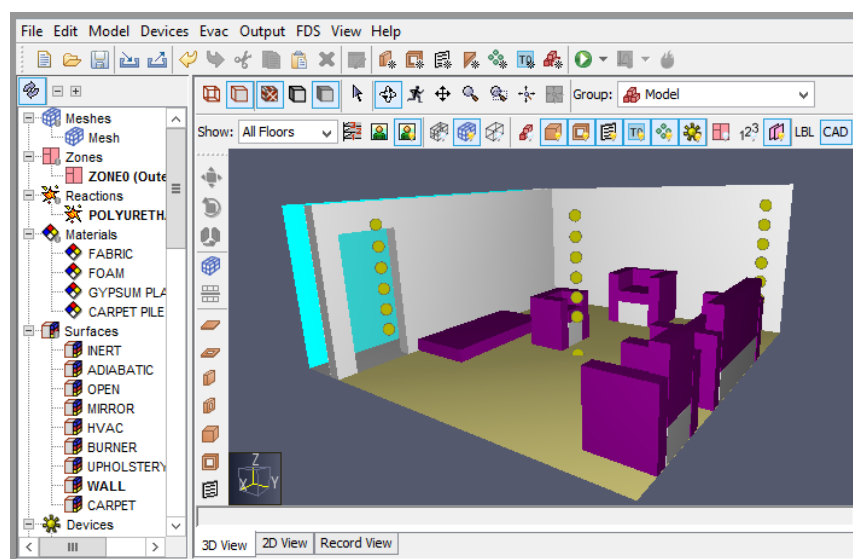
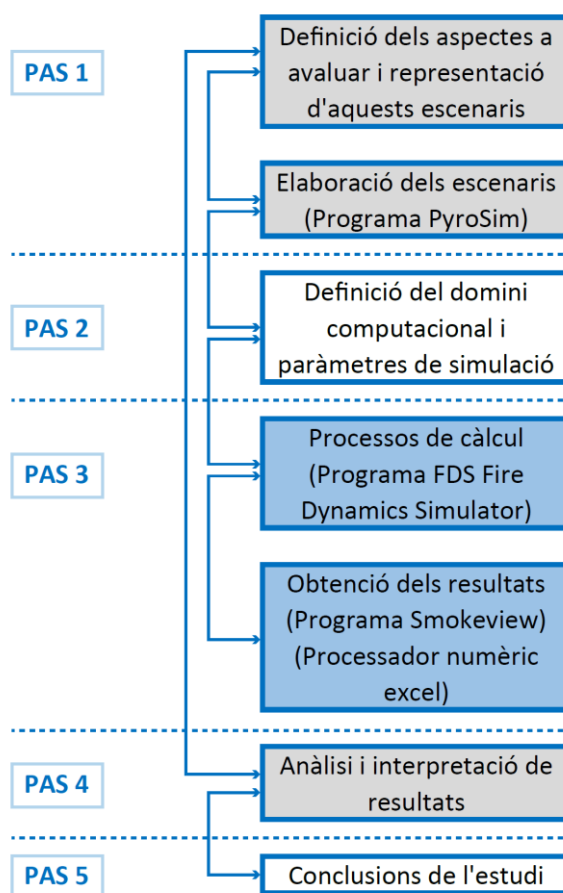


Figura 10. Interfície PyroSim

Pel que fa a la visualització dels resultats, existeix un programa complementari que també s'ha utilitzat, anomenat SmokeView. Al llarg de les simulacions, però, s'ha descobert que aquest programa ha quedat obsolet ja que Pyrosim (Figura 7) també incorpora un altre programa que permet il·lustrar de manera més visual i còmode per a la vista, els resultats obtinguts. Finalment, per realitzar les gràfiques, el mateix FDS extreu les dades de calor i temperatura y les col·loca en un arxiu Excel on l'usuari ja les pot visualitzar i extreure les conclusions pertinents.

## **2.4. Casos d'estudi**

El cas d'estudi escollit és la propagació de l'incendi en façana de fusta, una fase que succeeix un cop ja s'ha produït el *flashover* i l'incendi troba altres vies de propagació cap a l'exterior. En aquest cas, es centra en veure el comportament de l'incendi quan la propagació en façana es fa a través d'un material combustible com ho és la fusta. Per tal de seguir una metodologia experimental s'ha seguit l'esquema de la figura 11 que es troba a continuació.



**Figura 11. Esquema general de la fase experimental de la recerca basat en el de Giraldo, 2012**

Primerament, els paràmetres que s'han decidit controlar per qualificar la propagació de l'incendi són dos: la temperatura i el HRRPUV i com varien al llarg del temps. Per tant, el cas d'estudi escollit en aquesta primera fase experimental sempre serà el mateix. L'escenari construït s'ha aprofitat dels simulats per M. P. Giraldo en la seva tesis doctoral, però afegint certes modificacions. En el cas de Giraldo consta de tres habitacions en vertical les quals coincideixen amb la façana, en aquest cas ventilada. Per a la present investigació s'ha afegit un pis més al model i també s'ha canviat la tipologia de la façana a una de simple d'un material ignífug (com ho podria ser la totxana) però afegint un recobriments exterior de fusta. En la figures 12 i 13 es pot observar en detall les diferents capes que hi ha de cada material en la façana, i un dels escenaris que es simularan.

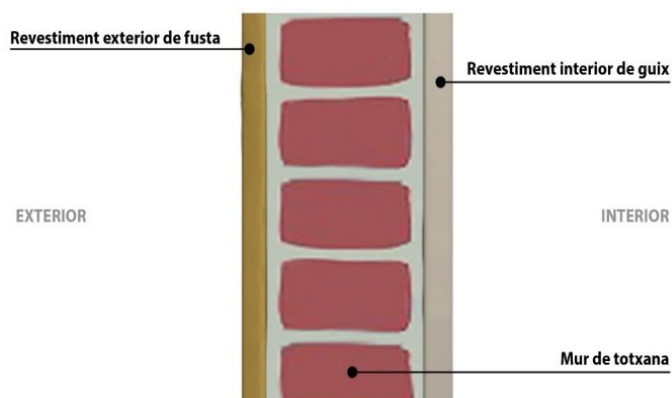


Figura 12. Detall de la secció de la façana escollida

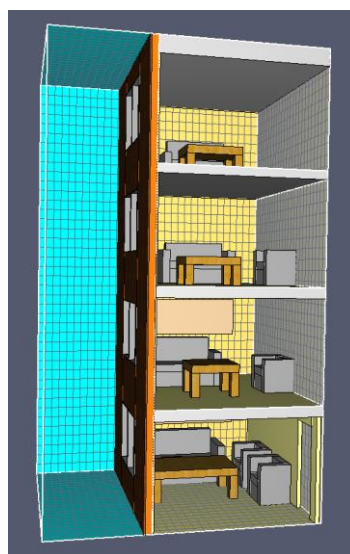


Figura 13. Exemple de model simulat en la investigació

Pel que fa al material combustible que propicia a que es produeixi l'incendi, després de nombrosos assajos previs amb el FDS, s'ha assegurat que hi hagi una càrrega prou gran de combustible com per a què es produeixi el *flashover* en la fase inicial de la simulació i es pugui dedicar més temps a la propagació de l'incendi. El mobiliari que s'ha afegit dins el recinte on es genera l'incendi, consta d'un sofà, dues butaques, una taula de fusta amb una calor de combustió més alta de l'habitual per al material, un quadre col·locat en la part superior del sofà i unes cortines en la zona de les finestres. En la figura 14 la disposició dels elements anomenats.

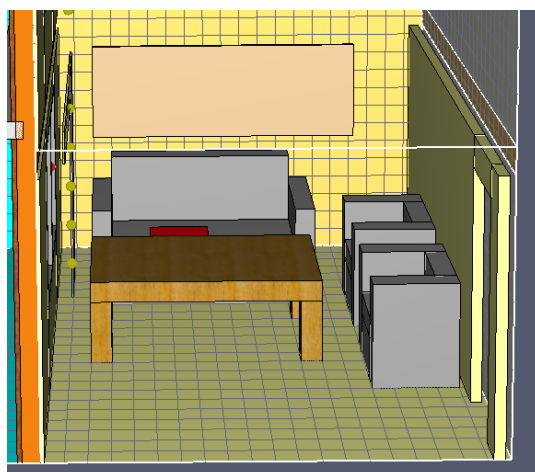


Figura 14. Recinte en la planta baixa on s'originarà l'incendi

El material per al terra de cada habitació consta de moqueta. Pel que fa als recobriments interiors de les parets són fetes de guix, material incombustible. Les finestres consten de



dos vidres separades per un marc d'alumini i estan programades per a què desapareguin un cop el *Heat Detector* (detector de calor) que les controla , enregistri una temperatura de 300°C. Aquest detector està col·locat en una zona molt pròxima als vidres. Les cortines també desapareixen un cop s'assoleixen els 120 graus en un altre detector de calor.

En la taula 1 es poden observar les diferents fases de l'incendi segons els successos que s'han plantejat en la hipòtesis.

Fases	Successos	Dispositiu	Descripció
1	Ignició	-	El foc s'inicia en el sofà mitjançant una font d'energia superficial del 0,4m x 0,4m
2	Creixement	-	L'incendi creix i comença a propagar-se cap a la resta de mobiliari
3	Desaparició de les cortines	Detector de calor	El foc es propaga cap a les cortines fins que desapareixen un cop s'assoleixen els 120°C
4	Trencament de les finestres	Detector de calor	Un cop s'assoleixen els 300°C en el detector, les finestres desapareixen
5	<i>Flashover</i>	-	El foc assoleix el seu màxim desenvolupament
6	Propagació	-	El foc s'estén a través de la façana i arriba als pisos superiors
7	Declivi	-	El combustible es consumeix i s'inicia el declivi de l'incendi

Taula 1. Fases de l'incendi segons la hipòtesis inicial

Per recollir el màxim nombre de dades, s'han col·locat termoparells tant a l'exterior com a l'interior de la façana. Pel que fa a l'exterior, tenint en compte que el primer termoparell està situat a un metre sobre el terra, cada 40 cm sobre el mateix pla vertical se'n troba un. El pla vertical travessa perpendicularment pel mig de la finestra que queda localitzada més pròxima a la font d'ignició. Pel que fa als termoparells interiors, estan localitzats en el mateix pla vertical que els exterior i se n'han distribuït de manera uniforme, quatre detectors per cada pis.

Les condicions climatològiques establertes, s'han definit les més neutres possibles: una temperatura atmosfèrica de 20 °C, una pressió de 1bar i cap corrent d'aire que pugui influir en el desenvolupament de l'incendi.

El mallat del model consta d'una xarxa tridimensional de cel·les perfectament cúbiques de 20cm de costat. Tenint en compte que el model té unes dimensions de 5m x 6,4m x 11m, es considera que la malla ja és prou fina per aconseguir uns resultats òptims en relació al cost computacional de cada simulació.

Cada simulació dura 900s (15 minuts), temps suficient per visualitzar el fenomen de la propagació de l'incendi a través de la façana, l'objecte de l'estudi.

## 2.5. Comparatives segons el revestiment de la façana

Per realitzar un primer anàlisi comparatiu, s'ha decidit comparar el paràmetre del flux de calor generat per l'incendi en tres casos diferents relacionats amb el tipus de material que s'utilitza en el revestiment. Aquest paràmetre al llarg del temps proporciona una idea de com evoluciona l'incendi. El primer cas consta d'un material incombustible, el segon agafa els valors tèrmics considerant de que es tracta d'una fusta de baixa combustibilitat, i el tercer, d'una fusta d'una combustibilitat més alta.

Tipus	Energia de combustió
Material incombustible	-
Fusta combustibilitat baixa	10 MJ/kg
Fusta alta combustibilitat	18 MJ/kg

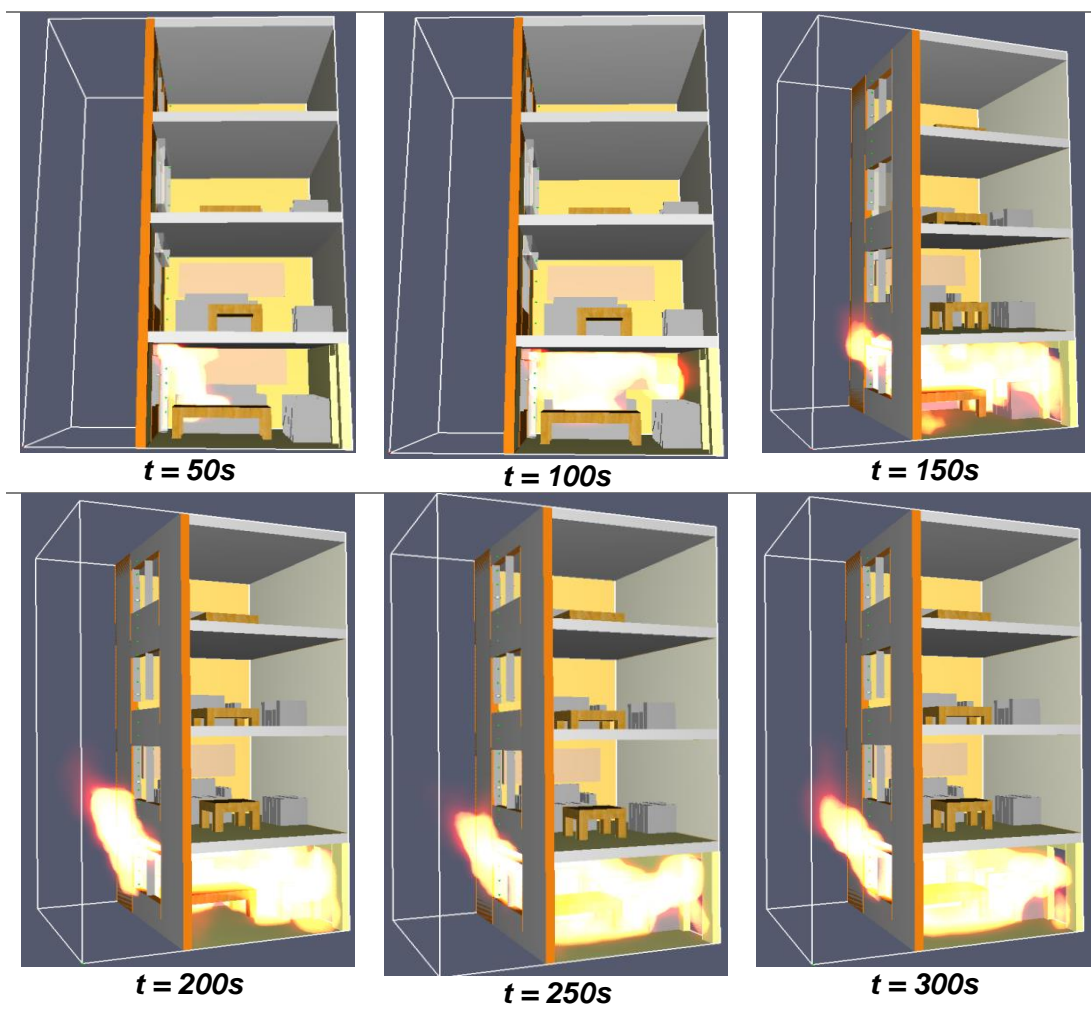
Taula 2. Energies de combustió considerades per al revestiment combustible

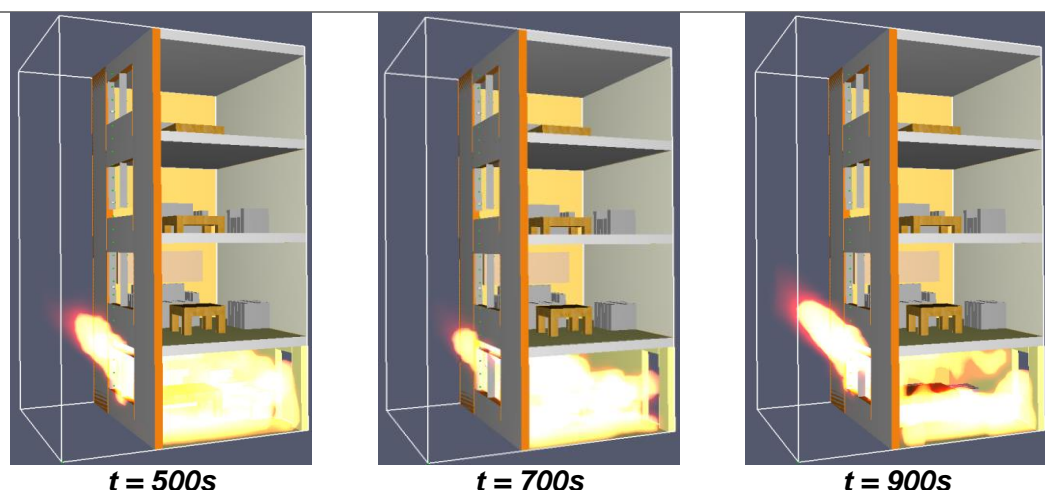
Per mostrar al llarg del temps l'evolució de l'incendi, s'han extret instantànies de les simulacions en els mateixos moments per veure d'una manera representativa com

evoluciona l'incendi. Les captures s'han realitzat al 50s, 100s, 150s, 200s, 250s, 300s, 500s, 700s i 900s i es procedirà a analitzar una per una.

### 2.5.1. Façana no combustible

Per tenir un punt de referència el més favorable possible, es decideix observar el comportament de l'incendi quan el revestiment de la façana està fet d'un material no combustible.



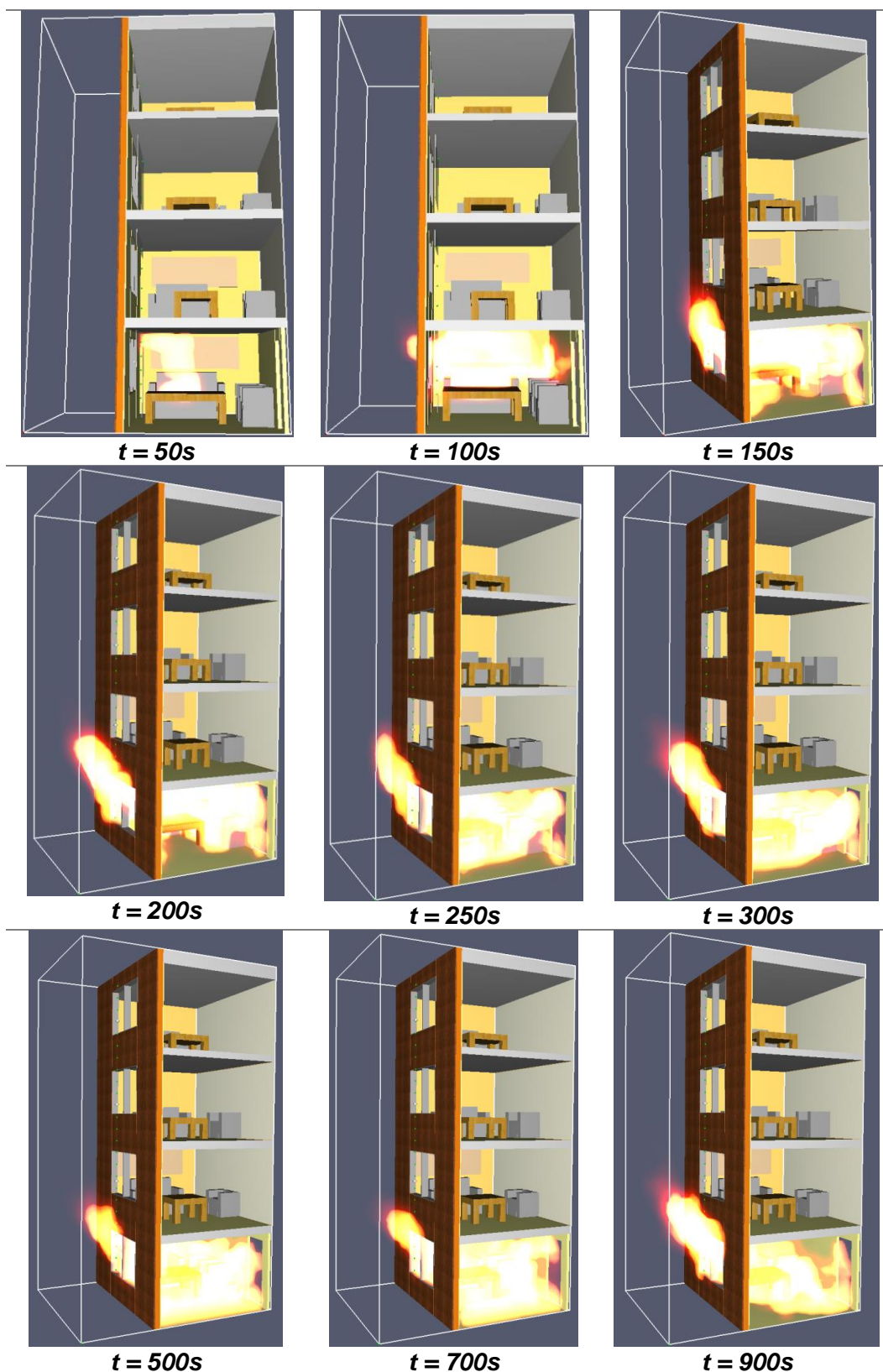


Taula 3. Simulació façana no combustible

En la taula d'imatges 3 es pot observar com el foc creix a una velocitat molt ràpida, degut a la gran inflamabilitat dels materials combustibles del recinte. Als 150 segons es pot observar que el foc ja ha trencat els vidres del pis inferior i es produeix el *flashover*. Les primeres flames comencen a pujar per la façana. Als 200 segons es pot apreciar la força que tenen les flames degudes al *flashover* ja que en poc temps assoleixen l'alçada de les finestres del primer pis i trencant les finestres. Al cap de 100 segons, però, les flames comencen a retrocedir en altura deguda a l'absència de material en la façana i, donat que no s'han establert fenòmens que propiciïn el *leap-frog*, aquestes no poden avançar cap a cotes superiors. Aquest fet es confirma quan s'observen les figures de la taula 3, corresponents als 500 i 700 segons respectivament. Per raons alienes a la simulació del model, aquesta va patir una aturada inesperada i irreversible. Es va decidir no repetir la simulació ja que la tendència de les flames no propiciarien a algun esdeveniment diferent i només quedaven uns 27 segons per simular.

### 2.5.2. Façana simple de fusta de combustibilitat baixa

En aquest apartat es mostren els resultats obtinguts de la simulació d'una façana simple amb el revestiment fet de fusta humida. La calor de combustió escollida és de 10MJ/kg.

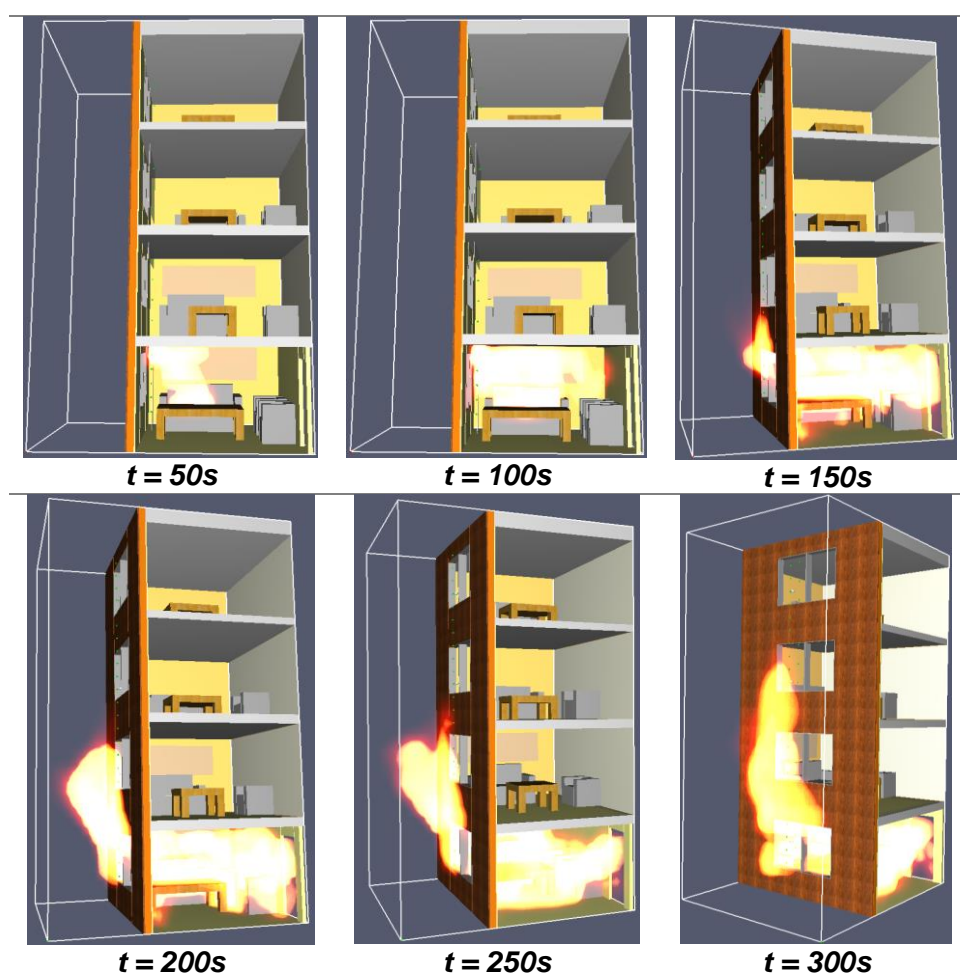


Taula 4. Simulació façana simple fusta fusta baixa combustibilitat

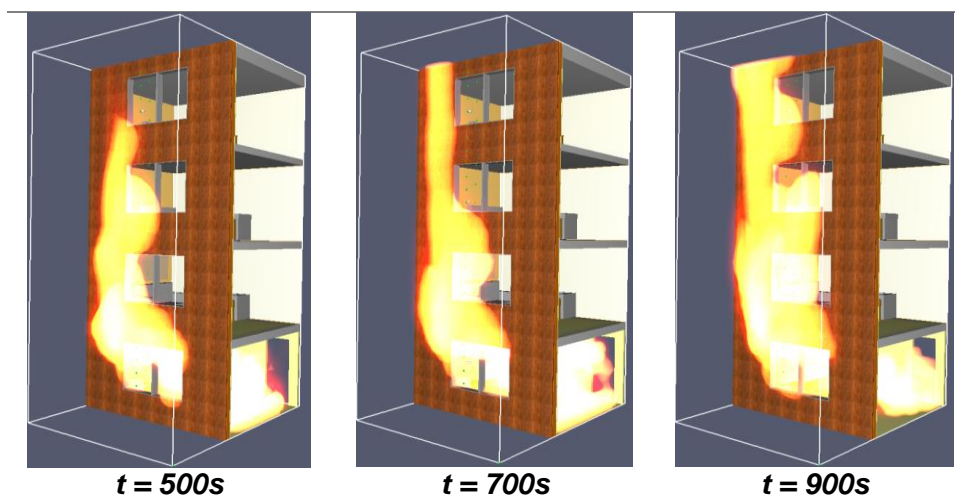
Els resultats que s'han obtingut són molt similars als de la façana no combustible. En la taula d'il·lustracions 4, corresponents als primers 300 segons, s'observa com les flames assoleixen aproximadament les mateixes alçades i un apropament cap al revestiment de la façana, símbol de que el revestiment està cremant i aconsegueix trencar els vidres del primer pis als 180 segons aproximadament. En les imatges corresponents als 500, 700 i 900 segons, però, s'observa com les flames segueixen en la mateixa posició. La combustió en el revestiment no ha aconseguit una reacció en cadena i encara que la part immediatament superior de la finestra del pis inferior sí que aconsegueix cremar, no aconsegueix propagar-se cap a cotes superiors.

### 2.5.3. Façana simple d'alta combustibilitat

Pel que fa a la simulació amb un revestiment de fusta d'alta combustibilitat (simulat amb una calor de combustió de 18MJ/kg), s'observen en la taula 5 quina ha estat la seva evolució.



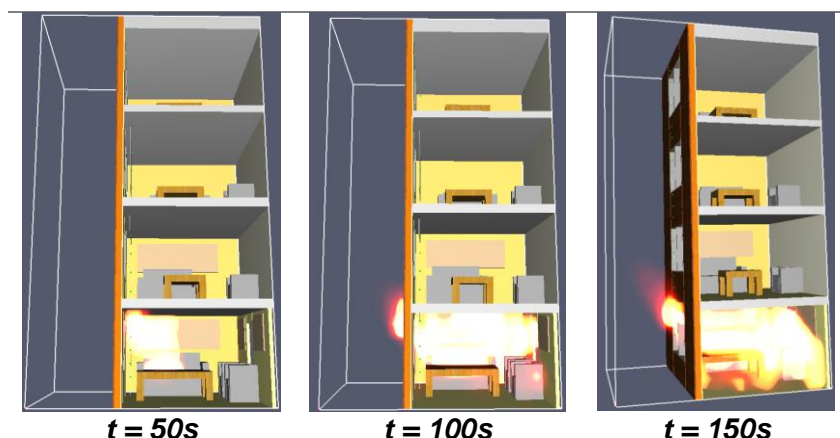


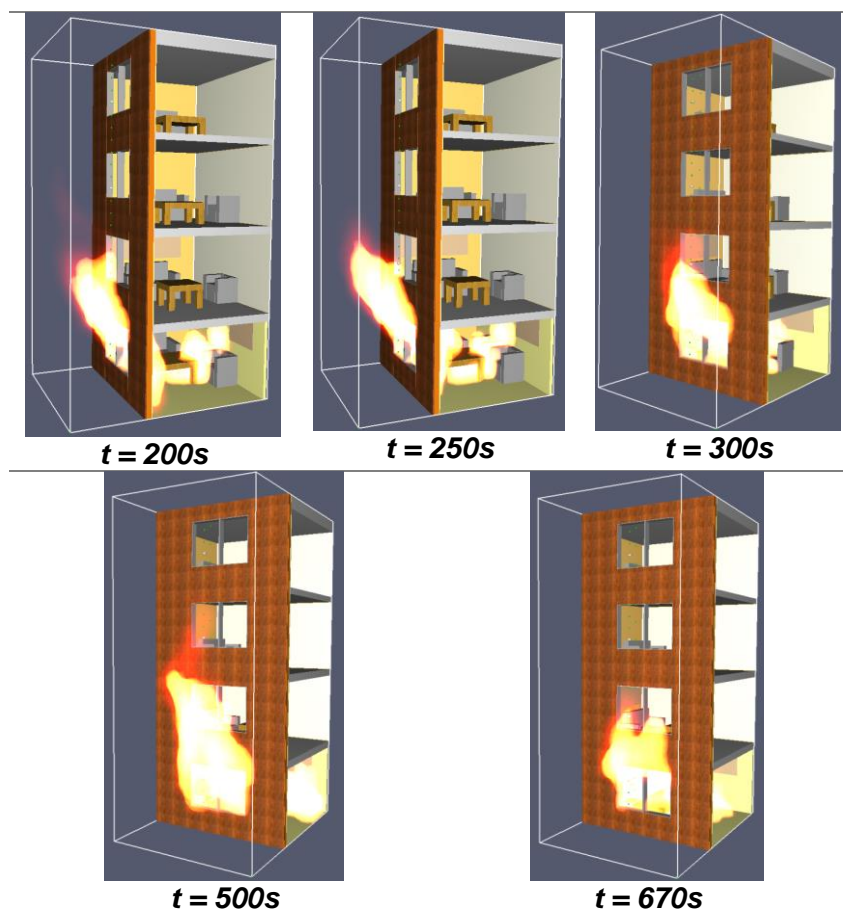


Taula 5. Simulació façana simple de fusta d'alta combustibilitat

Els primers 150 segons s'observa que l'incendi segueix el mateix patró i les primeres flames comencen sortir per les finestres de la planta baixa. En aquest cas, les flames ascendeixen ràpidament enganxades a la façana i al cap de 50 segons, ja han assolit la part superior del primer pis, havent trencat els vidres als 170 segons d'haver-se iniciat el incendi. A partir de llavors, en la imatge dels 300 segons, s'observa com les flames es desplacen cap a l'esquerra, vist des de l'exterior, mentre assoleixen la part inferior de la finestra del segon pis. En pocs segons, les flames assoleixen el sostre del model passant per el segon i tercer pis, sempre fent-ho des de l'esquerra de les finestres. Aquest fet es podria associar a la dessecació i la posterior piròlisis de la fusta en moments anteriors a la propagació. Les finestres del segon pis es trenquen als 270 segons i les del tercer als 330 segons.

Donat el comportament que s'observa en les flames en desviar-se cap a l'esquerra, es decideix fer una modificació geomètrica al model i moure la porta que hi ha en la cantonada oposada a la font d'ignició, i desplaçar-la cap al centre i repetir la simulació.





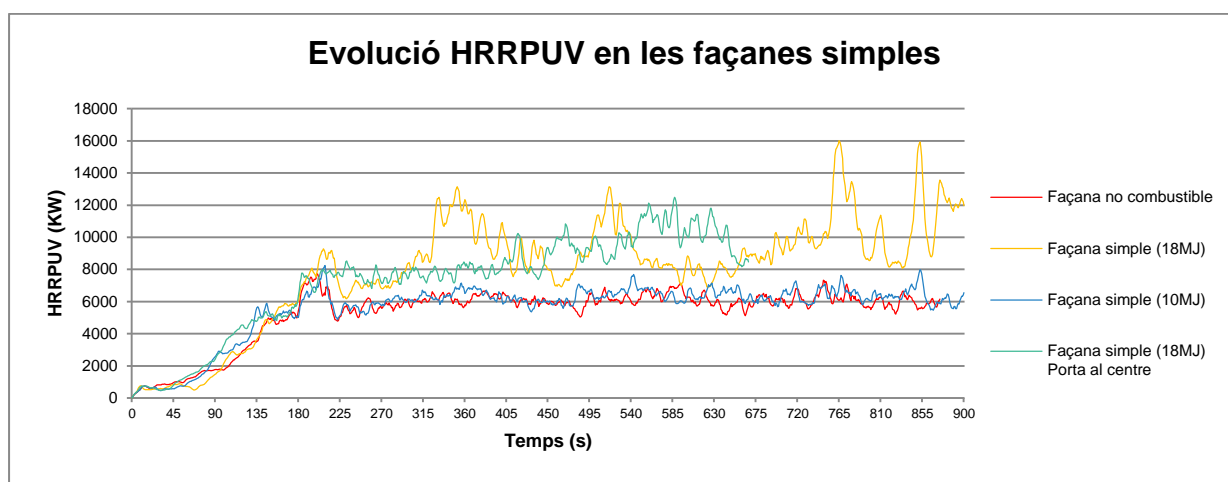
Taula 6. Simulació façana de fusta d'alta combustibilitat amb la porta al mig

Desgraciadament la simulació no es va poder completar al 100%, però sí fins als 670 segons. En aquest punt de l'anterior simulació, les flames ja havien mostrat la tendència a cremar la part esquerra façana, però com es pot observar en la taula d'imatges 6, les flames aquest cop segueixen una trajectòria més vertical. Aquest fet fa que els vidres es trenquin als 190, 300 i 500 segons corresponents al primer, segon i tercer pis. Un retràs en la propagació de l'incendi que per als dos primers pisos es de menys de mig minut, però que per l'últim pis sí que és de quasi tres minuts.

#### 2.5.4. Comparativa HRRPUV

Pel que fa al paràmetre escollit per a comparar els resultats, el HRRPUV, s'han extret les dades del flux de calor alliberada per unitat de volum referent a tot l'incendi. Aquest valor dóna una idea de la quantitat d'energia que s'allibera al llarg del temps de l'incendi. En la gràfica 1 s'observen els valors obtinguts. Cal dir que els valors han estat suavitzat ja que al tractar-se de foc, els valors poden oscil·lar molt bruscament en pocs segons, així que per obtenir corbes més visibles un cop representades, a cada valor se li ha fet la mitjana entre els dos valors anteriors i els dos posteriors.

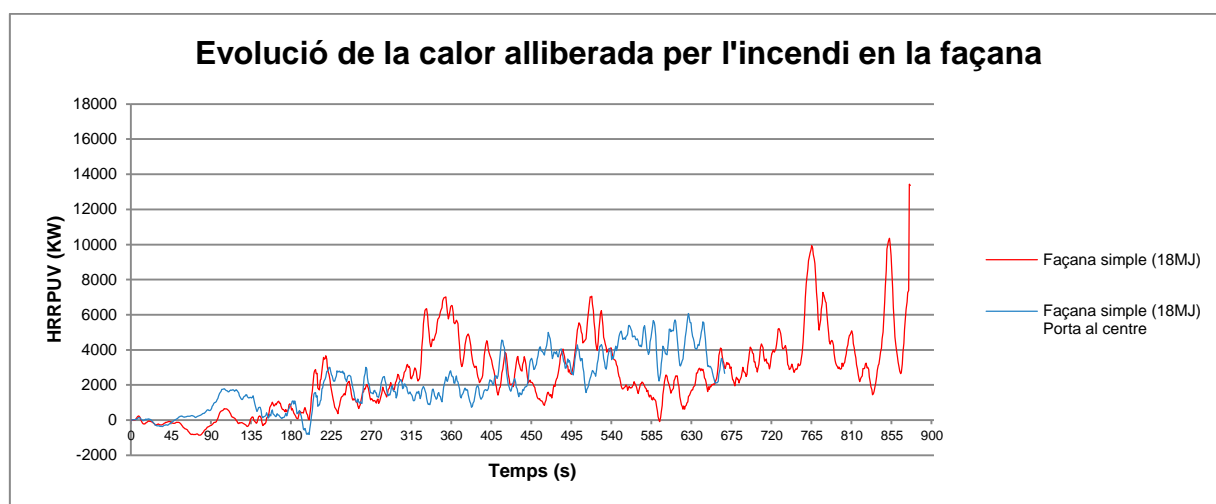




**Gràfica 1 Comparativa de l'HRRPUV entre les diferents simulacions de façanes simples**

Es pot observar com en l'etapa de creixement fins al *flashover*, les quatre simulacions segueixen un comportament pràcticament idèntic fins als 180-200 segons, on les simulacions de façana de material no combustible i la façana de material menys combustible pateixen una davallada major que les dues simulacions amb el material més inflamable. A partir d'aquest punt, les façanes menys combustibles tenen un comportament pràcticament constant, donat la inexistència de propagació cap a la façana. En canvi, les altres dues simulacions assoleixen nivells de calor alliberada molt superiors a les del *flashover*, en alguns punts inclús arriben a doblar-los i quasi triplicar-los. Després del *flashover*, entre les dues simulacions amb el material més combustible, no s'observa que segueixin el mateix patró: el model que té la porta en una cantonada de l'habitació, creix molt més ràpid que el de la porta al mig, com ja s'ha pogut observar en l'apartat 2.5.3. Degut a la inesperada parada de la simulació amb la porta al mig, no és possible determinar si s'assoleixen nivells de HRRPUV tant alts com ho fa en el tram final de la simulació de la porta a la cantonada. De totes maneres, es decideix prosseguir amb la investigació amb el model que té la porta a la cantonada ja que s'ha vist que és el que produiria un incendi més destructiu fins al moment.

En la gràfica 2 es pot observar la calor generada per la combustió de la façana. S'ha pres com a referència la simulació amb façana no combustible, restant els valors a les simulacions fetes amb els revestiments de fusta d'alta combustibilitat. En el cas de la façana de mitja combustibilitat s'ha decidit no incloure'l, ja que, com es pot observar en la gràfica 1, té pràcticament la mateixa evolució que la no combustible. Fins als 200 segons, les dades no són representatives ja que els valors negatius són conseqüència de les petites variacions entre les fases de creixement i *flashover* de les simulacions.



Gràfica 2 Evolució de la calor alliberada per l'incendi en la façana

## 2.6. Comparatives en casos de ràfecs

Arribats a aquest punt, l'objectiu passa ser el buscar solucions, mitjançant elements geomètrics en la façana, que dificultin l'avançament de les flames cap a cotes superiors emprant el model que s'ha observat en el punt 2.5.3. Les solucions adoptades són les d'incorporar un ràfec entre cada un dels pisos que ocupa tota la longitud del model. Cada ràfec s'ha escollit que fos d'un material incombustible per tal d'obtenir una solució el més restrictiva possible. Per tal de tenir el màxim nombre de casos s'han proposat fins a tres tipus de solucions atenent-se a la disposició geomètrica d'aquests: la distància perpendicular que surt cap a l'exterior de la façana respecte el revestiment de fusta, la col·locació del ràfec respecte les finestres (just en la part superior de la llinda de la finestra inferior o just al mig de la distància que hi ha entre les dues finestres) i la incorporació un tram de material incombustibles de 20 cm a la part superior del ràfec. En la taula 7 es pot observar la matriu de simulacions realitzades en aquesta investigació.

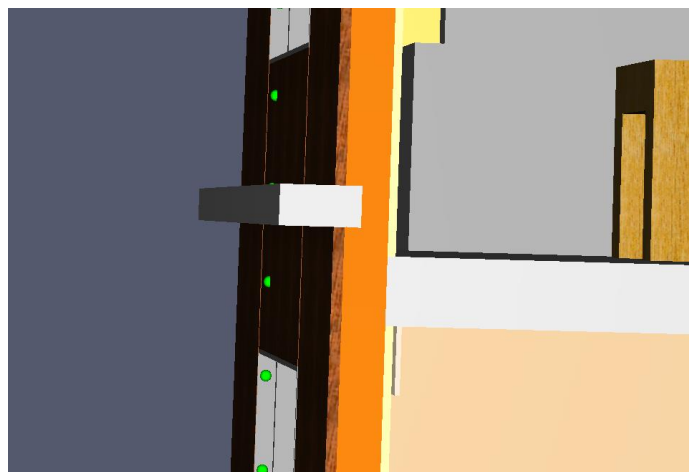
	20 cm	40cm	60 cm	80 cm	20+20 cm	40+20 cm
Meitat						
Tocant la llinda						

Taula 7 Matriu de simulacions per als ràfecs

Segons la normativa, la distància entre les finestres pot ser menor si s'incorporen elements sortints a la façana com es pot observar en la figura 7. Per fer el disseny més robust i només centrar-se en la comparativa de com els ràfecs afecten en la propagació, es decideix mantenir les mateixes condicions geomètriques de les finestres.

Per a aquestes simulacions es tindran en compte les temperatures a diferents cotes per poder comparar els resultats obtinguts. Els punts a estudiar són quatre: el temps que triga el foc a trencar els vidres de les finestres a cada pis, comparar les temperatures que s'enregistren per cada una de les col·locacions del ràfec (meitat o tocant la llinda) en la part inferior i superior d'aquest, les temperatures en la part inferior i superior de cada finestra discriminant la col·locació del ràfec i, finalment, les temperatures a l'interior de cadascun dels pisos. En l'apartat 2.7 es detallen amb més exactitud quins termoparells són els que enregistren les dades de temperatura i la comparativa de totes les simulacions.

La disjuntiva entre la col·locació del ràfec ve donada per el fet de tenir material combustible just a sota d'aquest, afecta o no a la propagació de l'incendi cap a pisos superiors. Per eliminar qualsevol dubte relacionat amb la propagació del foc en el tram del ràfec s'ha decidit fer el ràfec més gruixut del que seria habitual, de 20cm, ja que sorgeix el dubte de que el material és tant prim, que per el refinament de la malla que s'utilitza, no s'observi realment el salt de temperatures entre la part inferior i superior del ràfec. Una altre modificació realitzada és d'allargar el ràfec cap a l'interior de la façana, com es pot veure en la figura 15, amb l'objectiu d'eliminar qualsevol pont tèrmic o forat que el programa pugui considerar com a espai per on el foc es pot propagar, encara que físicament no sigui visible.



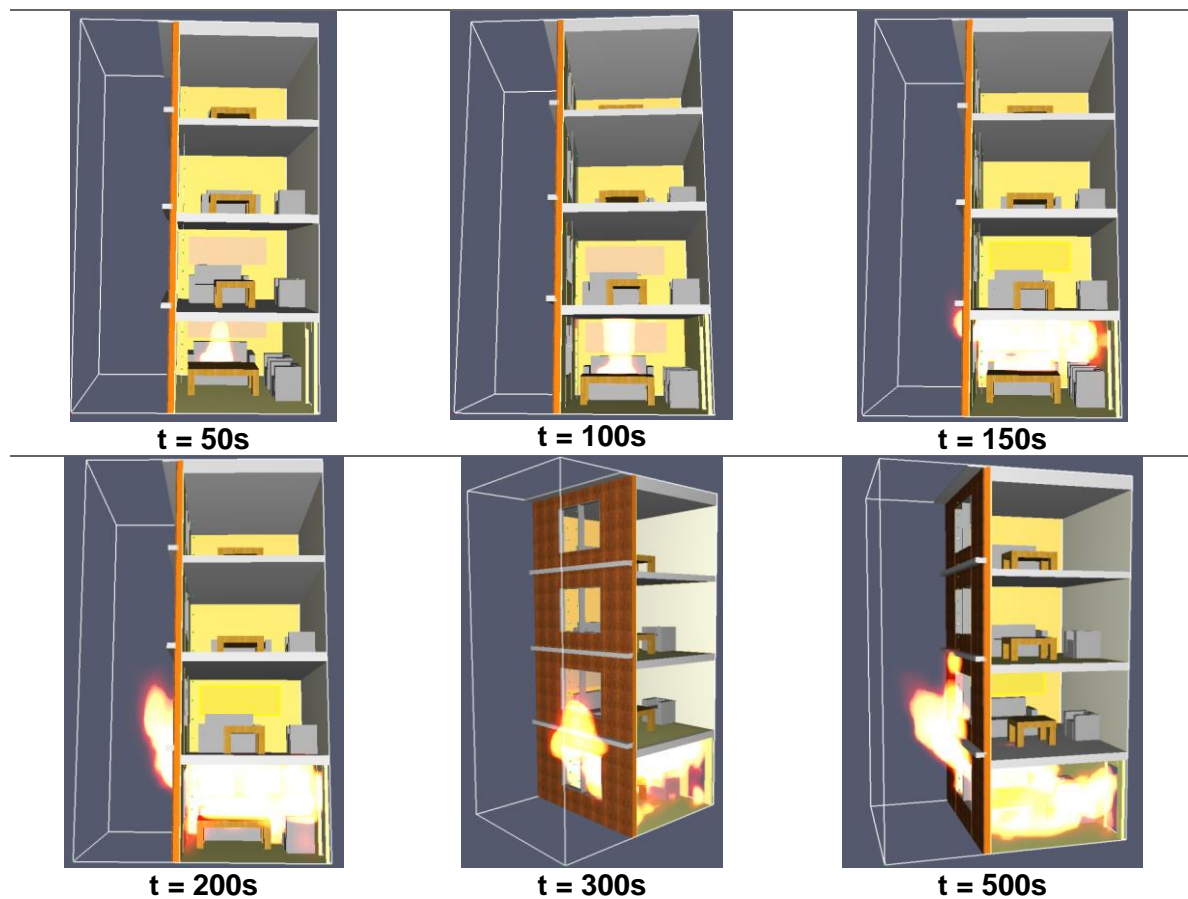
**Figura 15 Detall del ràfec incrustat en la façana**

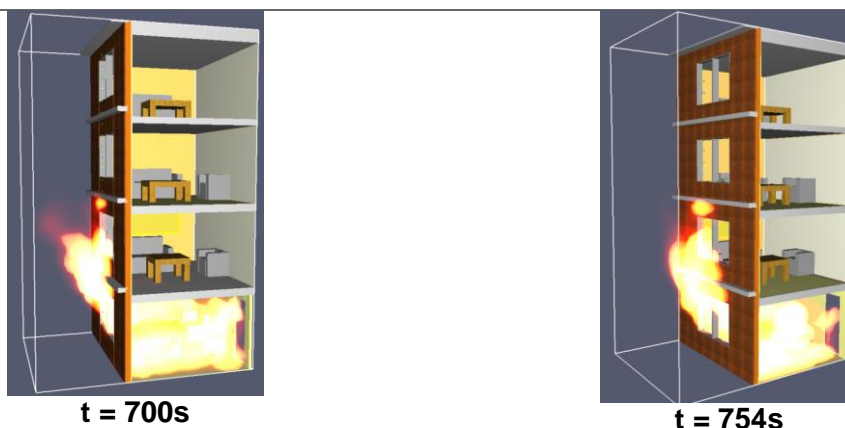
Abans de realitzar la comparativa, però, es farà una petita descripció del que s'observa en cada simulació com s'ha fet en l'apartat 2.5.

### 2.6.1. Ràfec de 20 centímetres en la meitat

Com ha succeït amb anterioritat, per raons alienes a la simulació, aquesta s'ha vist aturada i amb la impossibilitat de reprendre-la. Tot i això, portava 754 segons simulats, un 85% del total, on es poden apreciar la propagació de l'incendi per la façana sense cap problema.

En les la taula d'imatges 8, es pot observar com es repeteix el comportament de la fase d'ignició, creixement i *flashover* de l'incendi fins al segon 150.



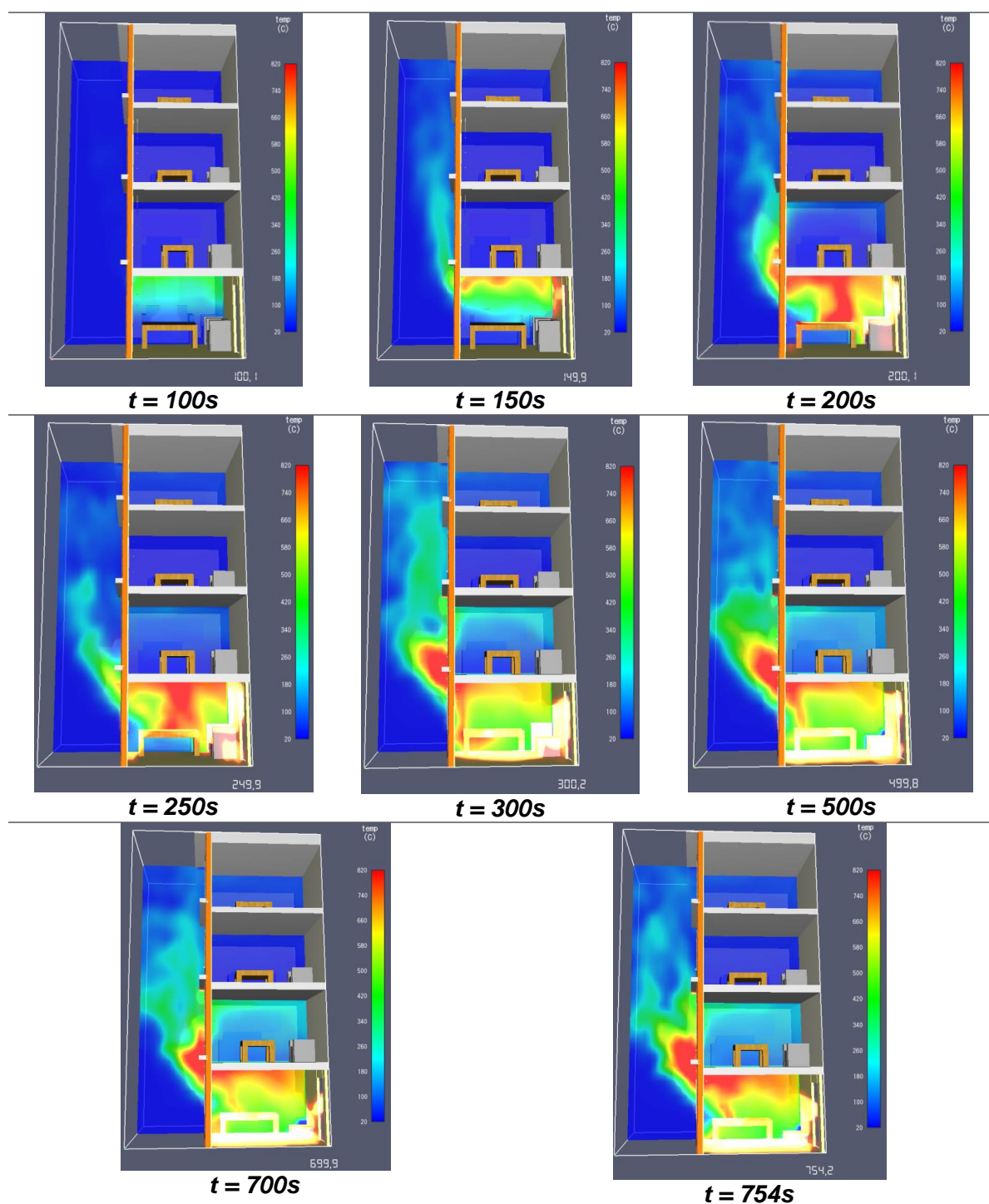


Taula 8. Simulació amb ràfec 20 cm a la meitat

A partir dels 200 segons s'observa com les flames han superat amb certa facilitat el ràfec que hi ha entre la planta baixa i el primer pis. En els pròxims 100 segons les flames segueixen propagant-se sense desplaçar-se cap a un costat com ho feia en el cas 2.5.3, fins que arriben quasi a la part inferior del ràfec entre el primer i segon pis. Als 500 segons, ja comença a cremar el revestiment inferior al segon ràfec, encara que amb poca intensitat ja que durant els 250 segons restant que dura la simulació, no s'observen signes clars de que es propagui cap a pisos superiors. En nombroses ocasions el foc entra dins el primer pis però al no tenir materials a prop per on propagar-se, no acaba d'incendiar el mobiliari que hi ha en l'interior.

Els vidres es trenquen als 180 i 270 corresponents al primer i segon pis. Els vidres del tercer pis no resulten afectats.

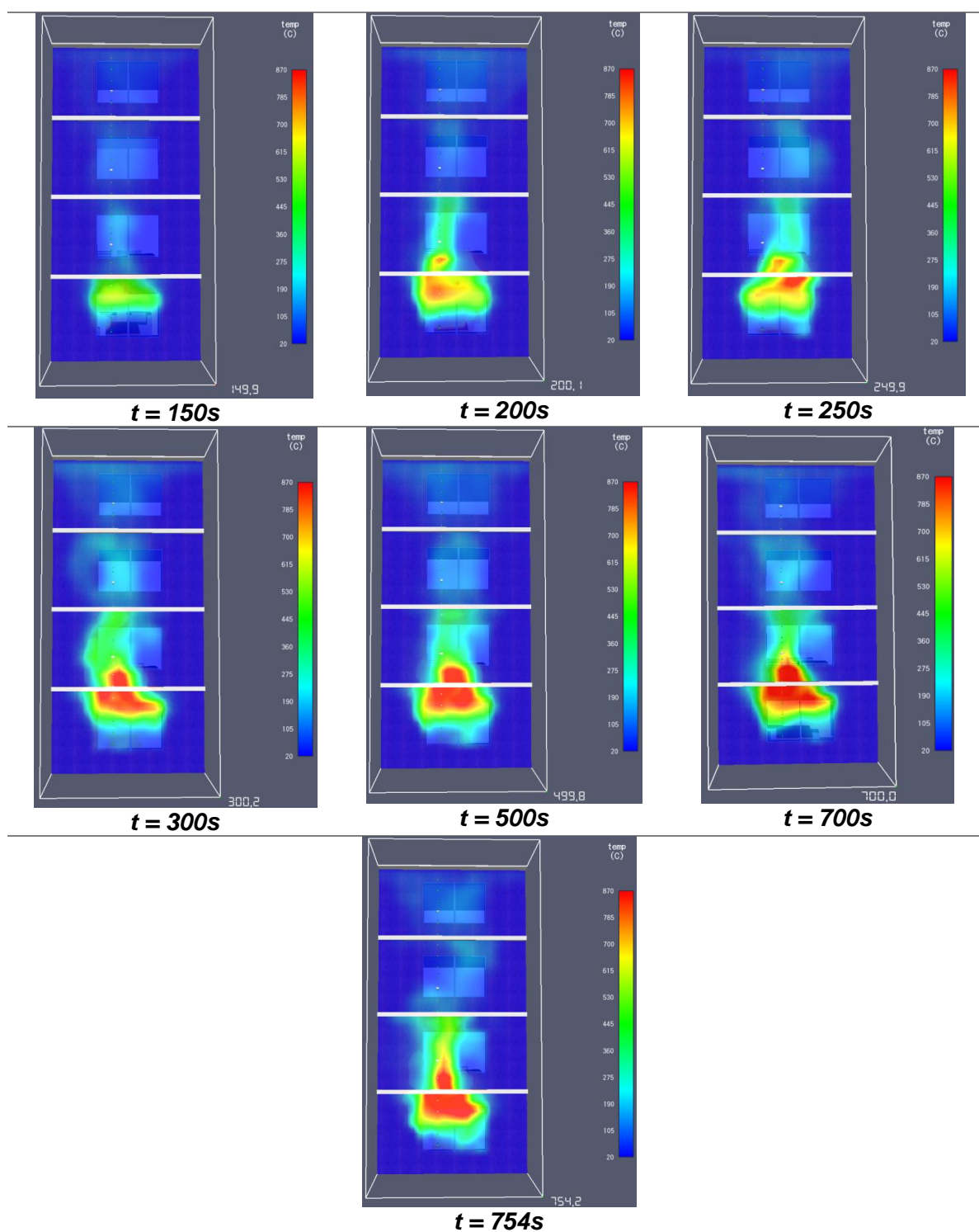
Pel que fa a les temperatures assolides en la façana, en la taula d'imatges 9 es pot observar, de manera gràfica, sobre el pla on estan col·locats tots els termoparells, el comportament de les flames quan surten del recinte inferior i quins valors s'assoleixen. En aquest cas també es va produir una aturada inesperada però tampoc es va decidir repetir-la ja que des dels 300 segons la simulació no s'observa una progressió en l'avançament de les flames significativa.



Taula 9. Simulació 20cm a la meitat amb projecció de temperatures en el pla perpendicular que passa pel mig de la finestra més propera a la font d'ignició

En les captures de la taula 10 es poden observar les temperatures superficials a la façana. En aquestes, les temperatures més altes s'acumulen a la part inferior del ràfec, i, just per sobre, la superfície d'aquestes és més estreta; els ràfecs actuen com a ponts tèrmics entre un pis i l'altre, provocant que sigui més difícil la seva propagació.

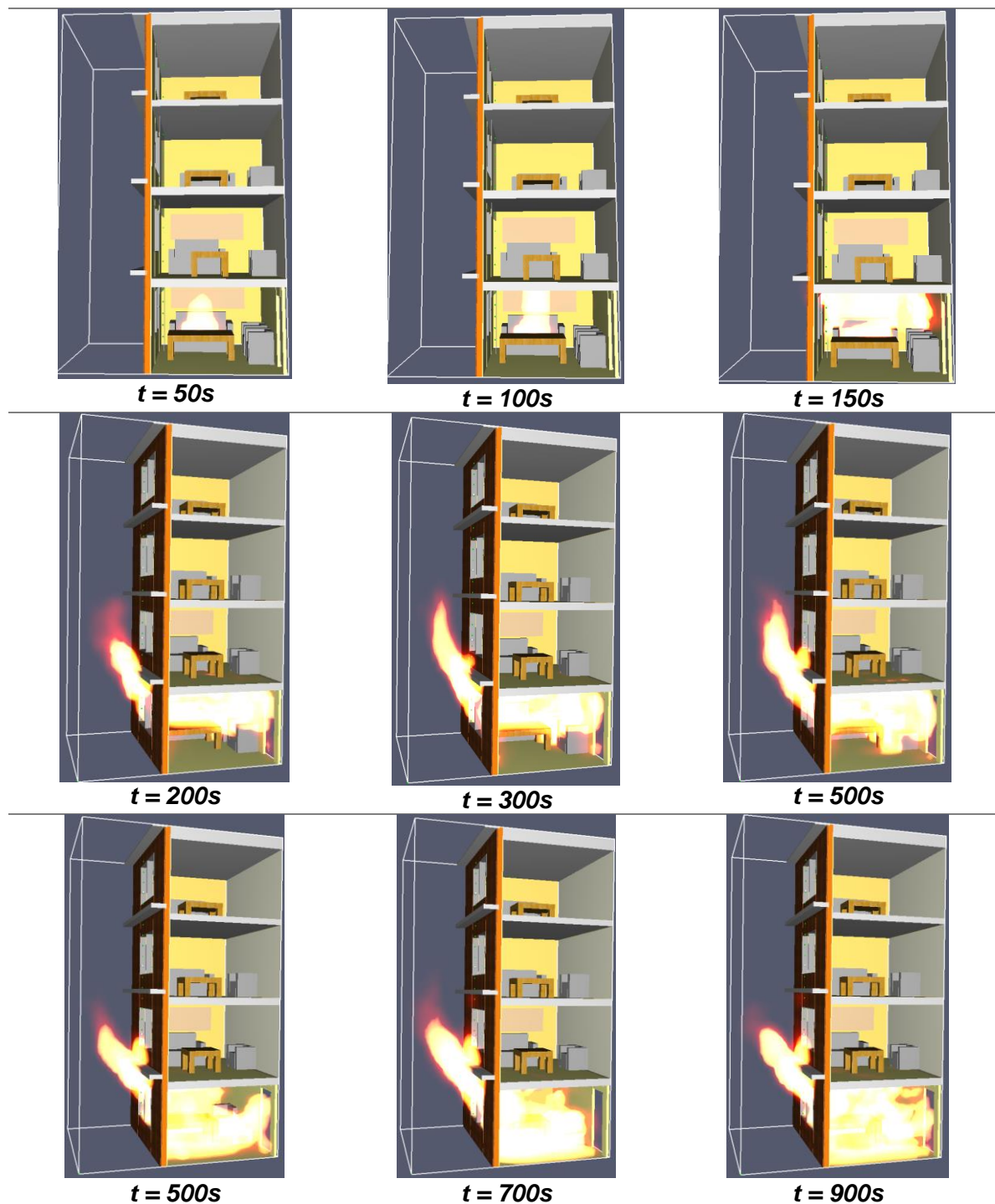




Taula 10. Temperatures en la simulació 20cm a la meitat sobre la superfície de la façana

### 2.6.2. Ràfec de 40 centímetres en la meitat

En la taula 11 es poden observar les imatges captades en els diferents instants per veure l'evolució de l'incendi quan el ràfec mesura 40cm.

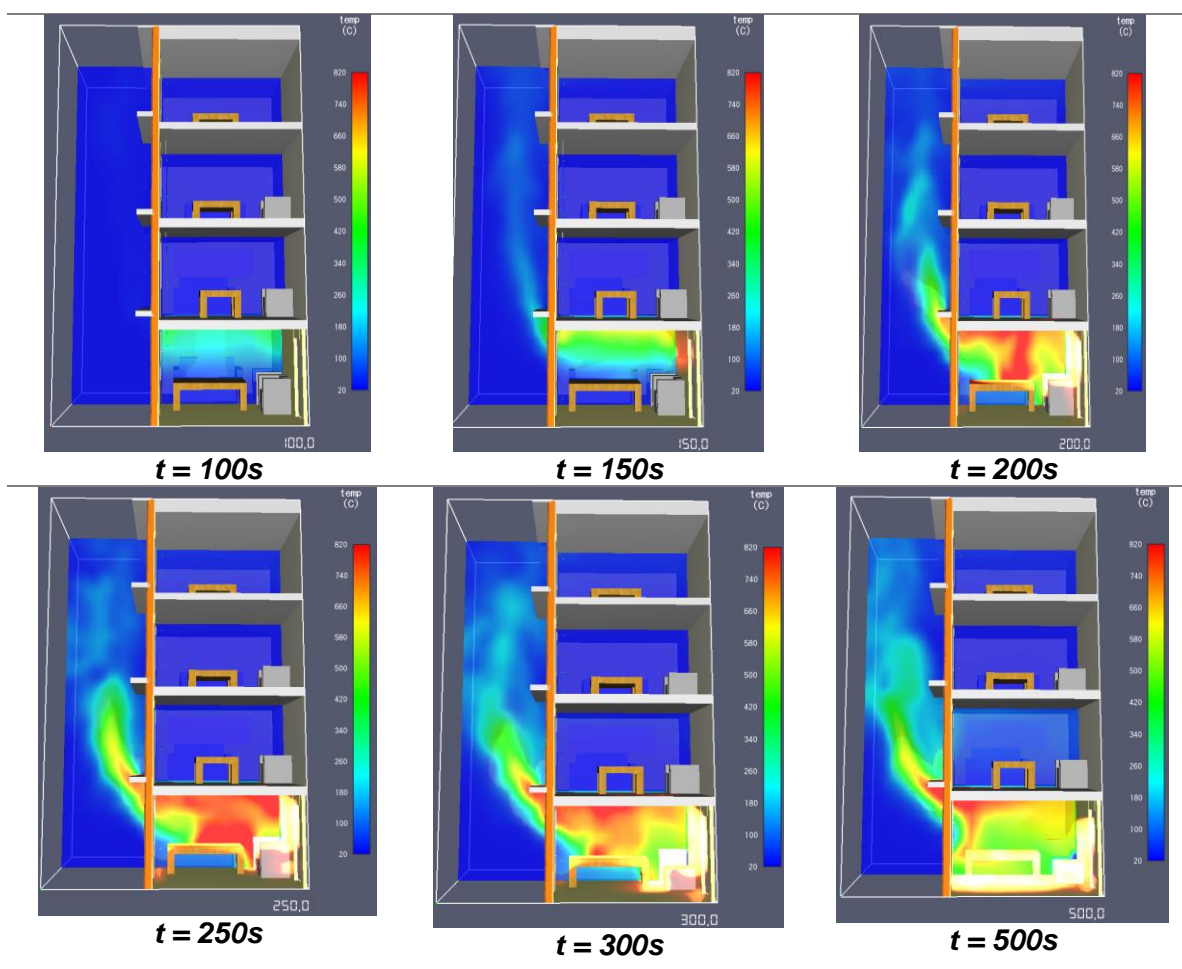


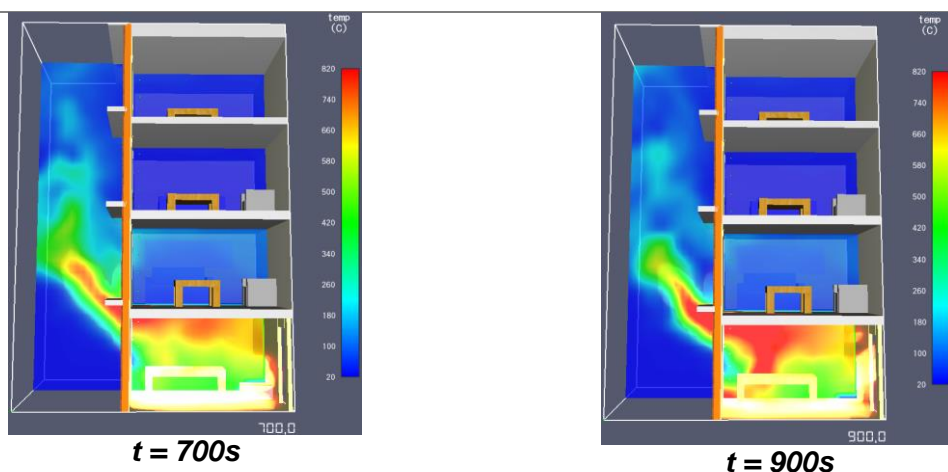
Taula 11. Simulació amb ràfec 40cm a la meitat



Com en el cas anterior, les flames assoleixen l'alçada de les finestres del primer pis en els primers 200 segons. En aquest cas, però, les flames no estan tocant el revestiment de fusta que hi ha just per sobre el ràfec. Als 300 segons les flames aconseguixen començar a cremar el revestiment inferior de la finestra del primer pis. En el transcurs dels 200 segons següents les flames que s'han propagat cap al revestiment de fusta del primer pis creixen fins a assolir les finestres del primer pis, on probablement, s'hagués continuat propagant si els materials combustibles estiguessin més a prop. A partir dels 500 segons, però, l'incendi s'estabilitza i no s'aconsegueix propagar cap al revestiment superior a la llinda del primer pis, ni pel centre ni per cap dels laterals recoberts sencers de fusta.

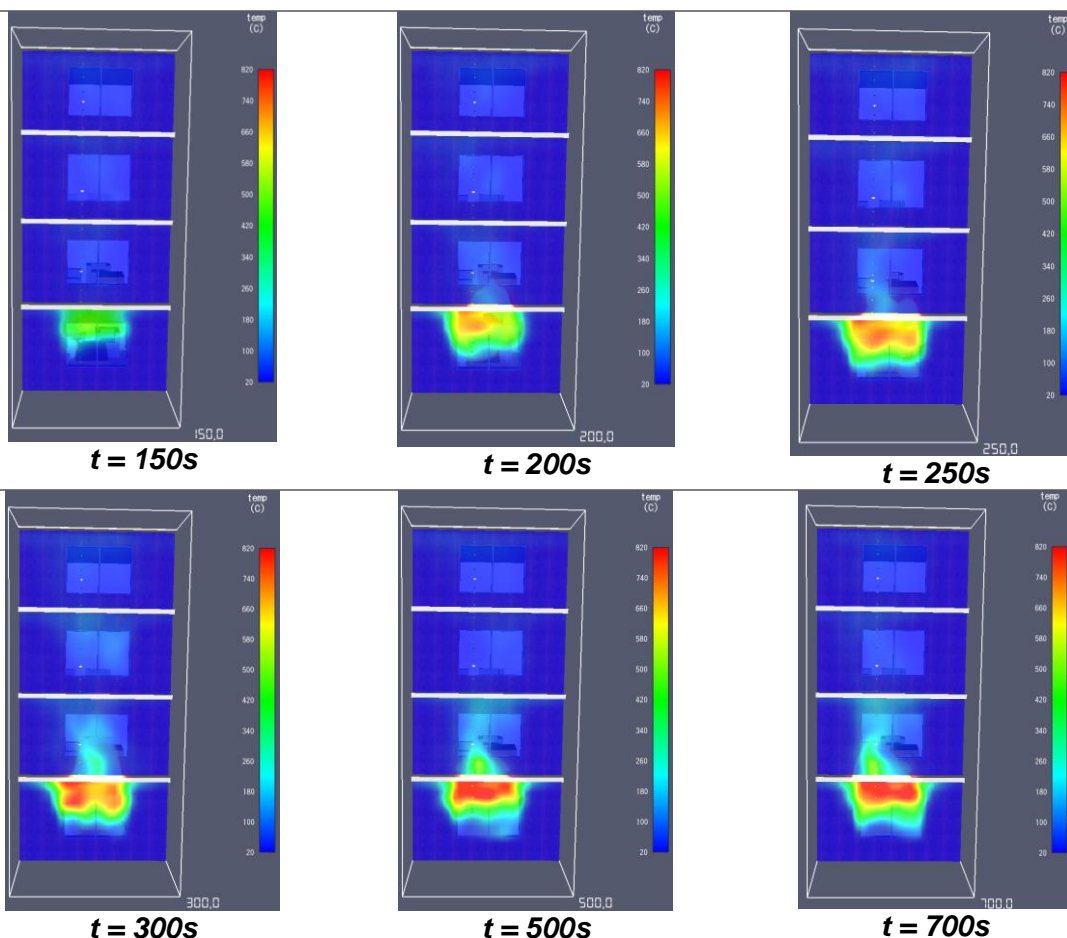
Els vidres del primer pis es trenquen als 350 segons aproximadament (170 segons més tard que al cas del ràfec de 20 centímetres), just quan les flames comencen a cremar el revestiment superior a al ràfec. Els vidres dels pisos superiors romanen intactes.

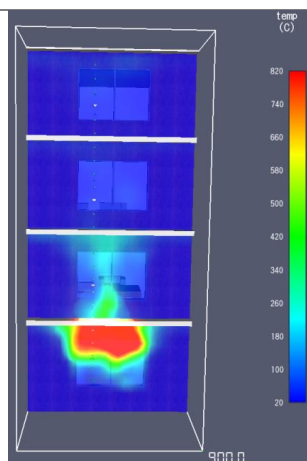




**Taula 12. Simulació 40cm a la meitat amb projecció de temperatures en el pla perpendicular que passa pel mig de la finestra més propera a la font d'ignició**

En les imatges posteriors a 300 segons es pot observar com les flames surten per la finestra però segueixen una trajectòria que les allunya de la façana per l'acció del ràfec. També s'observa com a la llarga, i per l'acció tèrmica d'aquestes, aconseguixen propagar-se cap al revestiment superior del ràfec.





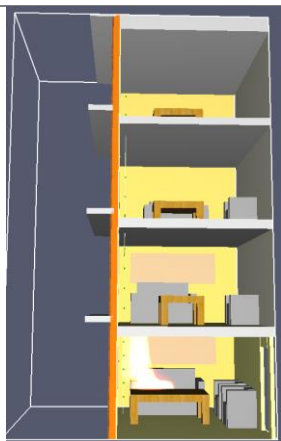
**$t = 500s$**

**Taula 13. Temperatures en la simulació 40cm a la meitat sobre la superfície de la façana**

En les imatges de la taula 13 es pot observar com n'és d'evident l'efecte del ràfec en les temperatures de la superfície de la façana. Encara que s'aconsegueixen propagar les flames, la diferència de temperatures és de l'ordre de 300-400°C.

### 2.6.3. Ràfec de 60 centímetres en la meitat

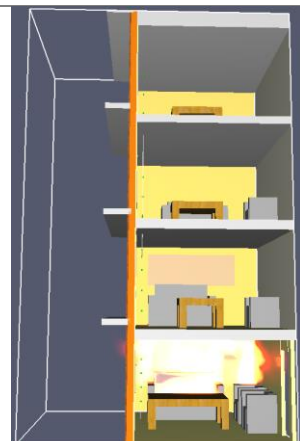
En aquesta simulació, s'amplia en 20 centímetres la profunditat exterior dels ràfecs.



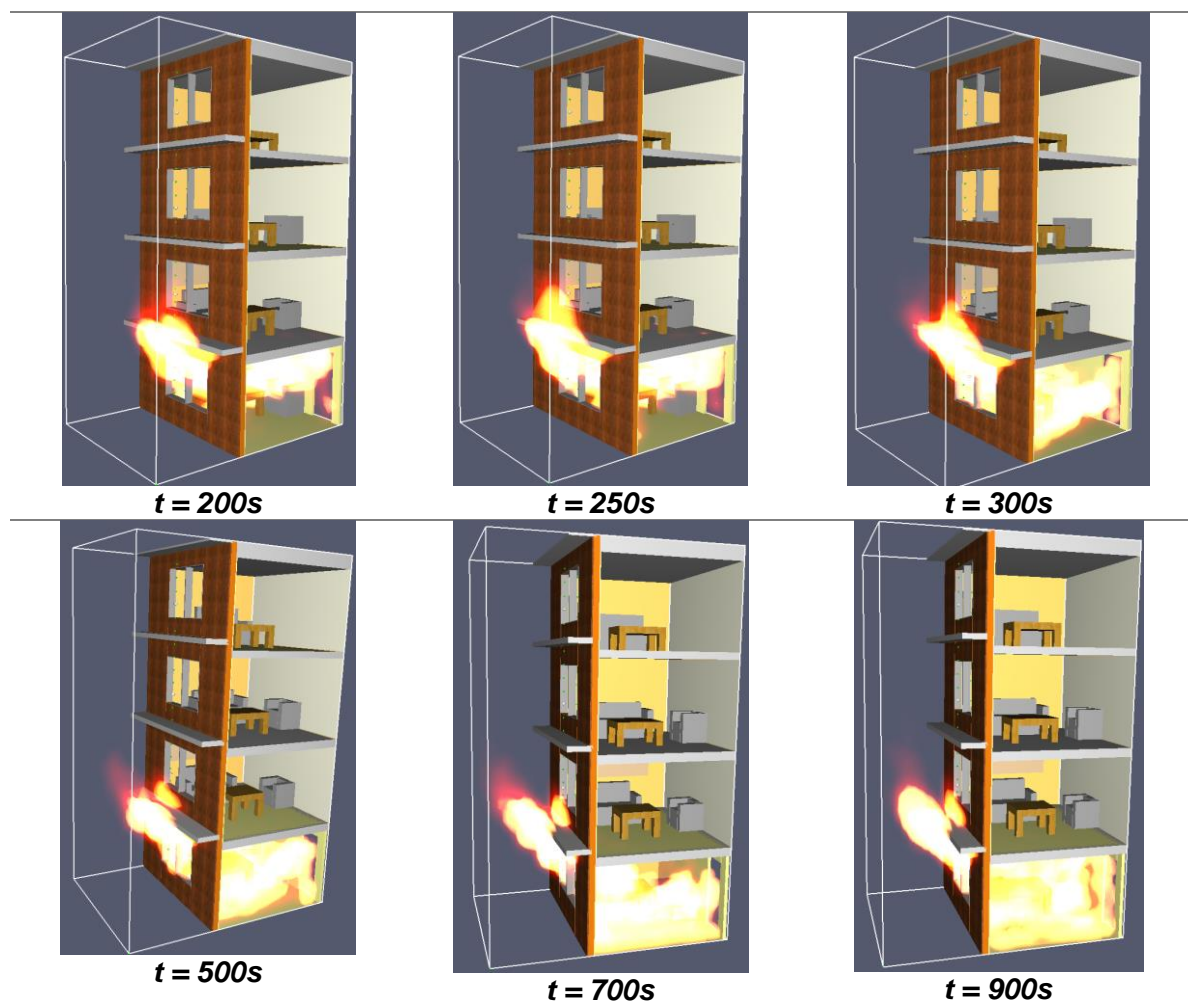
**$t = 50s$**



**$t = 100s$**



**$t = 150s$**

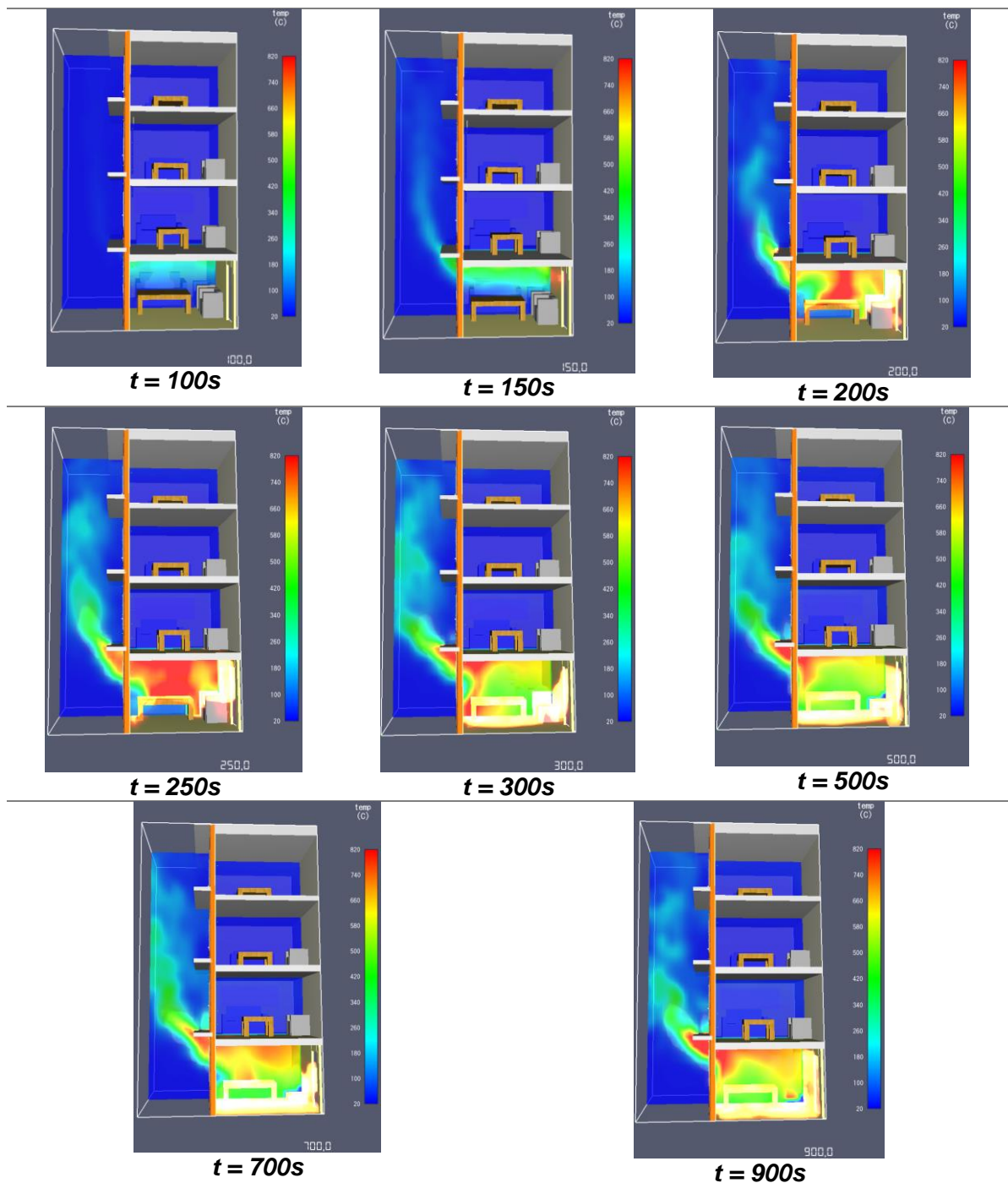


Taula 14. Simulació amb ràfec 60cm a la meitat

Com es pot observar, succeeix un cas similar al de l'apartat 2.6.2, les flames creixen igual en els primers 200 segons. En el segon 300 s'observa com les flames segueixen una trajectòria molt més horitzontal, però es mostra com es comença a generar un segon focus en el revestiment superior del ràfec. Aquest fet pot ser degut a que el programa no mostra realment la magnitud de les flames que sí fan contacte amb la fusta, o que donades les temperatures que s'assoleixen, la fusta inicia un procés d'autoinflamació. Posteriorment el comportament de l'incendi és el mateix que en la simulació de l'apartat 2.6.2.

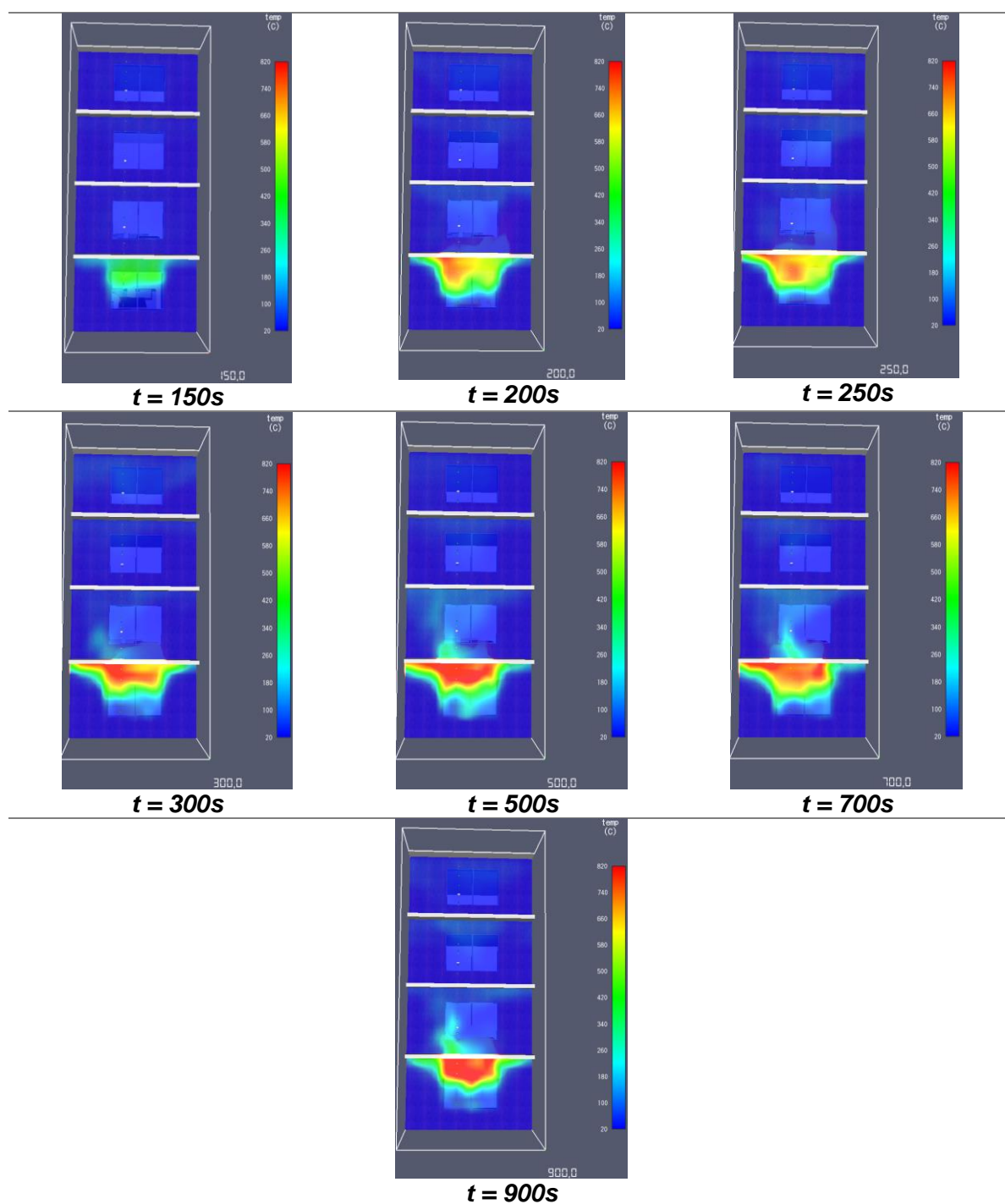
Els vidres del primer pis però no s'arriben a trencar, ja que la temperatura màxima que enregistra el detector de calor que la controla és de 220°C.





Taula 15. Simulació 60cm a la meitat amb projecció de temperatures en el pla perpendicular que passa pel mig de la finestra més propera a la font d'ignició

En les imatges de la taula 15 es pot observar la trajectòria encara més horitzontal de les flames allunyant-se de la façana i com poc a poc es genera un segon foc a la part inferior de la finestra del primer pis amb menys poder calorífic.

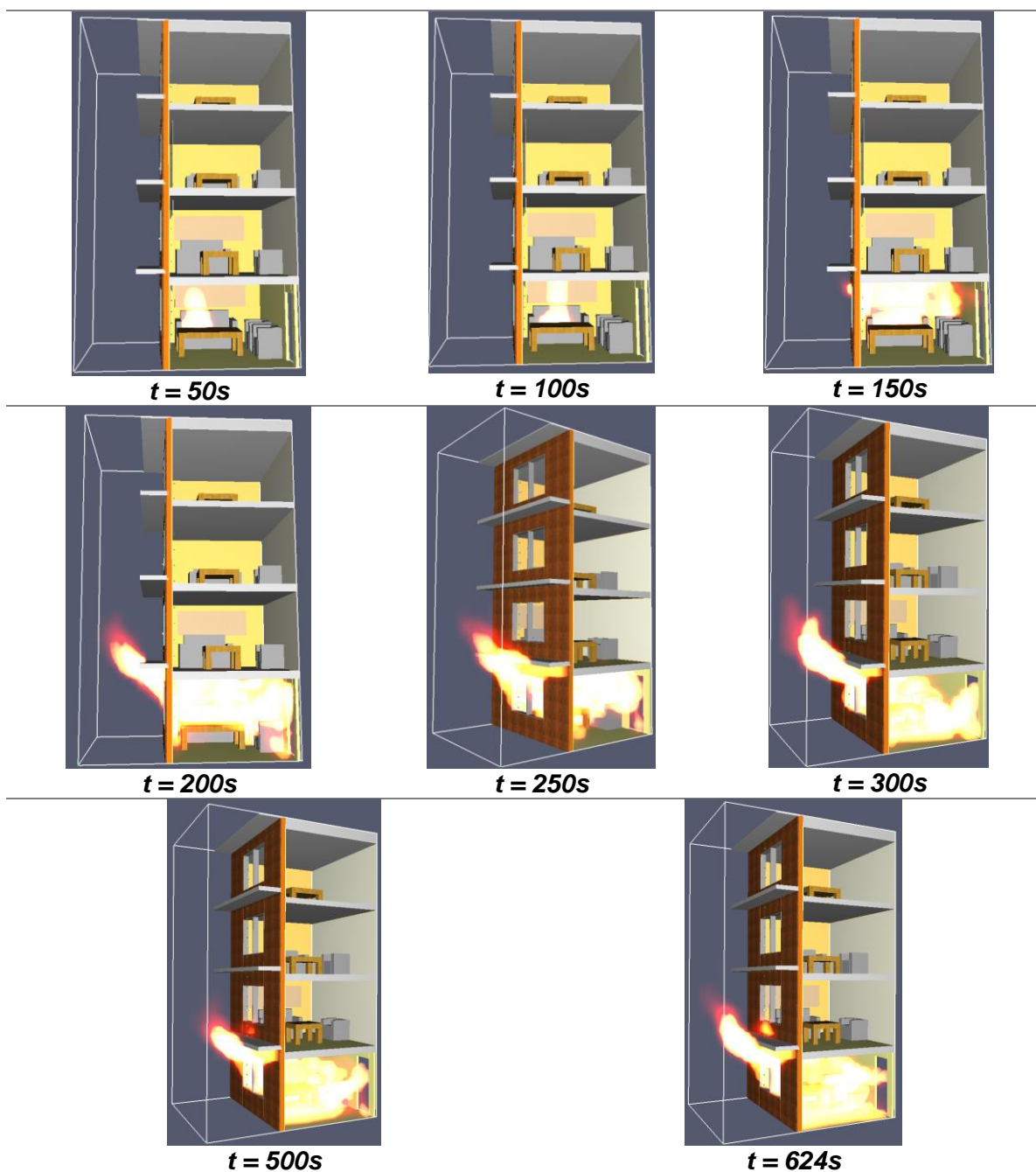


Taula 16. Temperatures en la simulació 60cm a la meitat sobre la superfície de la façana

Si la evidència en la diferència de temperatures superficials és evident en el cas del punt 2.6.2, en aquest encara és més agosarat: la diferència de temperatures és de l'ordre de 500-600 °C, com es pot observar en la taula 16.

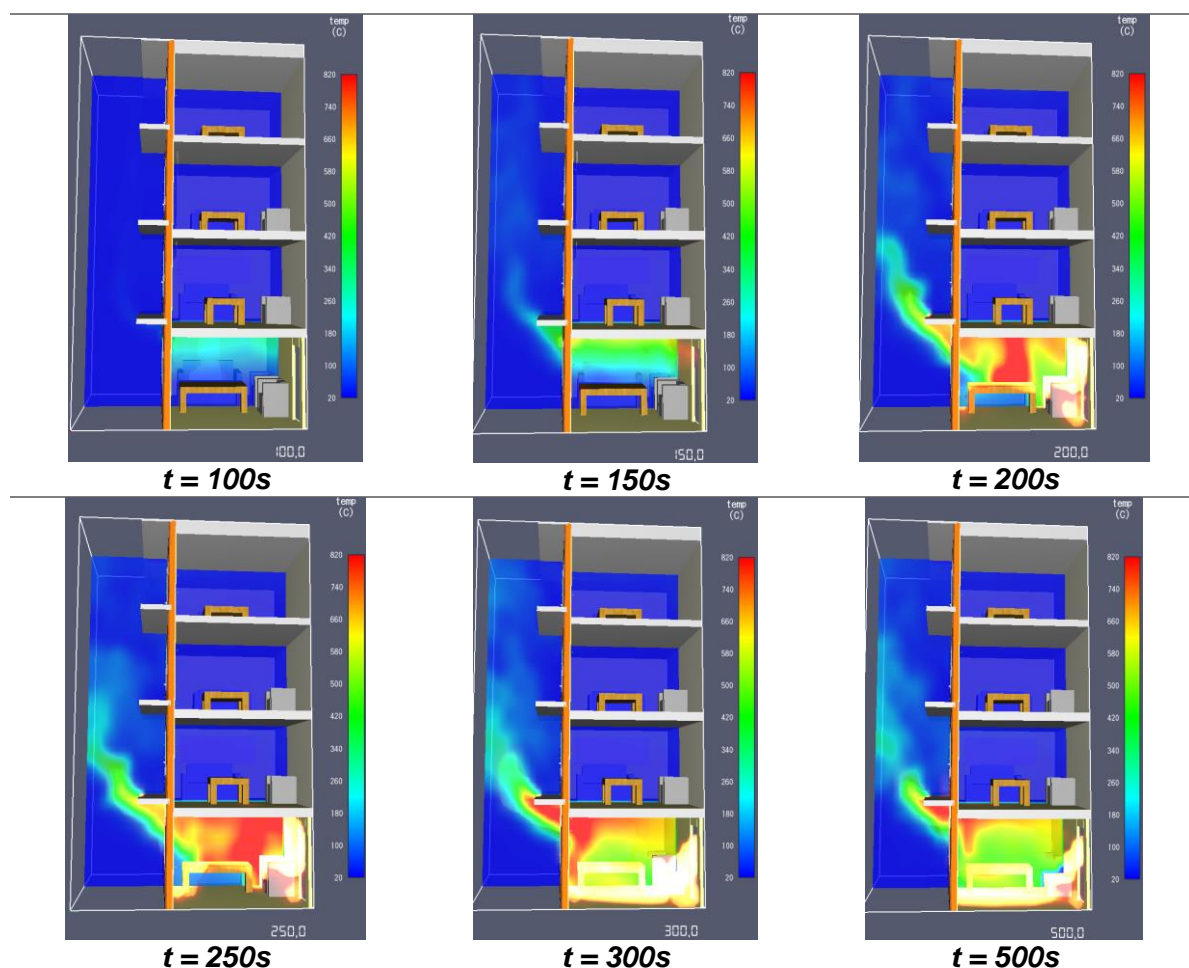
#### 2.6.4. Ràfec de 80 centímetres en la meitat

Com ja ha succeït en anterioritat, per motius aliens a la simulació, pateixen aturades irreversibles ja que el programa no deixa reprendre la simulació. En aquest cas la simulació va patir una aturada imprevista quan portava 624 segons simulats. De totes maneres s'ha decidit incloure-la perquè un cop vistos els resultats no s'aprecia que hagi de succeir res que modifiqui la propagació de l'incendi basat en les experiències de les simulacions anteriors.

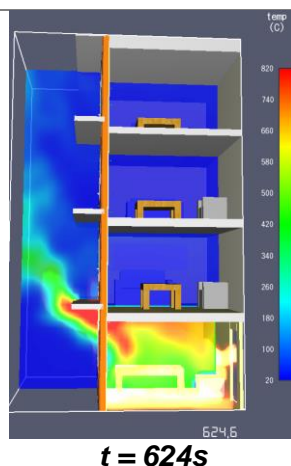


Taula 17. Simulació amb ràfec 80cm a la meitat

Com es pot observar, a partir dels 150 segons, les flames ja comencen a sortir per la finestra i en 50 segons creixen ràpidament fins a ocupar tota la cavitat que es genera entre el ràfec i la façana. Un cop arriba al final del ràfec, la superfície que han de tornar a recórrer cap enrere i procedir a efectuar el *leap-frog* és insalvable. Aquest fet es confirma a partir de les imatges de 250 segons cap endavant, on es veu que les flames creixen cap a l'exterior de l'edifici, sense arribant a propagar-se verticalment. Els vides de les finestres del primer pis romanen intactes, i, per conseqüència, els del segon i tercer.



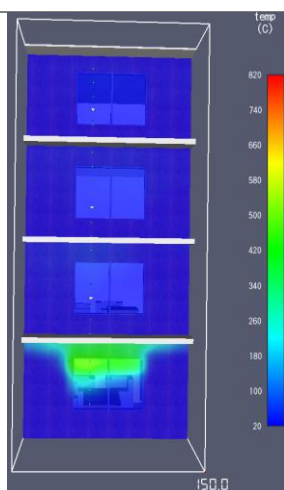




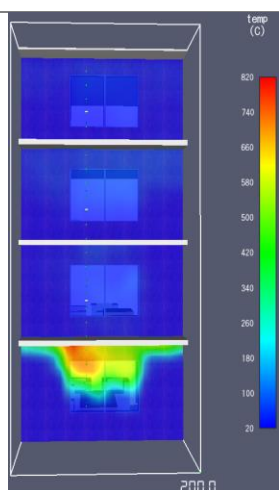
***t = 624s***

**Taula 18. Simulació 80cm a la meitat amb projecció de temperatures en el pla perpendicular que passa pel mig de la finestra més propera a la font d'ignició**

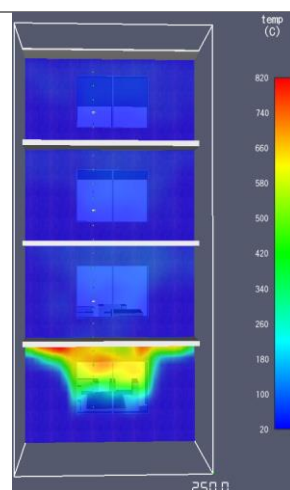
En les imatges de la taula 18 s'observa encara més clar la distància que les flames són incapaces de salvar degut a l'absència de material combustible en la zona del ràfec.



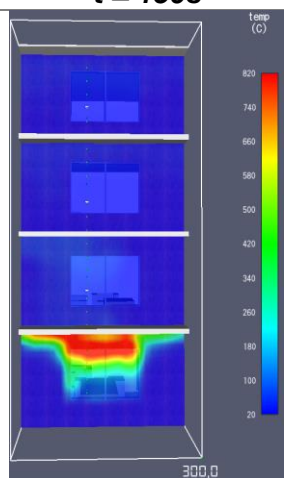
***t = 150s***



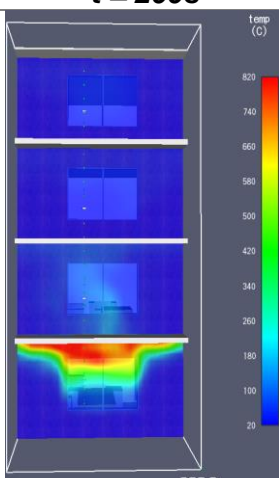
***t = 200s***



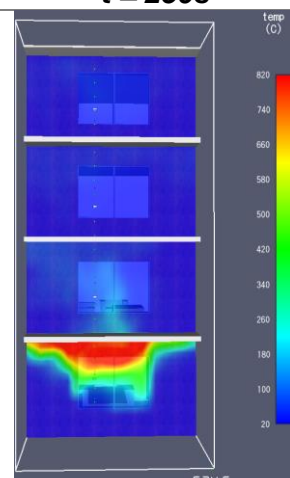
***t = 250s***



***t = 300s***



***t = 500s***



***t = 624s***

**Taula 19. Temperatures en la simulació 80cm a la meitat sobre la superfície de la façana**

En les imatges de la taula 19 es pot observar com les flames, al no poder consumir el revestiment de fusta que hi ha per sobre el ràfec, comencen a expandir-se progressivament cap als laterals superiors del recinte on es produeix l'incendi. En aquest cas, les temperatures que s'assoleixen són de quasi 900°C, mentre que per sobre el ràfec de uns escassos 200°C, és a dir, una diferència d'uns 700°C.

#### 2.6.5. Ràfec de 20+20 centímetres en la meitat

Un cop s'ha aconseguit frenar l'abans de l'incendi a base de sumar amplitud a al ràfec, s'ha plantejat d'aconseguir el mateix efecte però sense haver de considerar ràfecs tant grans. Vistos els fenòmens que succeeixen en la propagació cap al pis superior en els ràfecs de 40 i 60 centímetres, es decideix fer una modificació a la part immediatament superior del ràfec i afegir una franja de 20 cm d'altura del mateix material incombustible que el ràfec com es pot veure en la figura 16. L'objectiu és obstaculitzar el *leap-frog* amb menys superfície de ràfec.

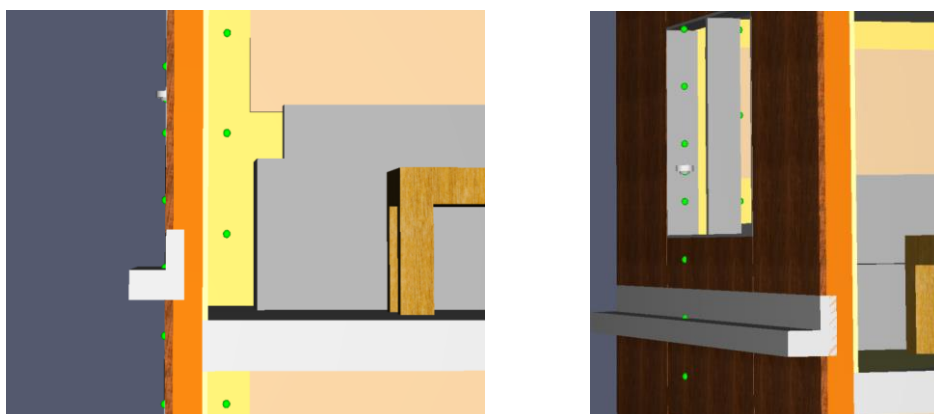
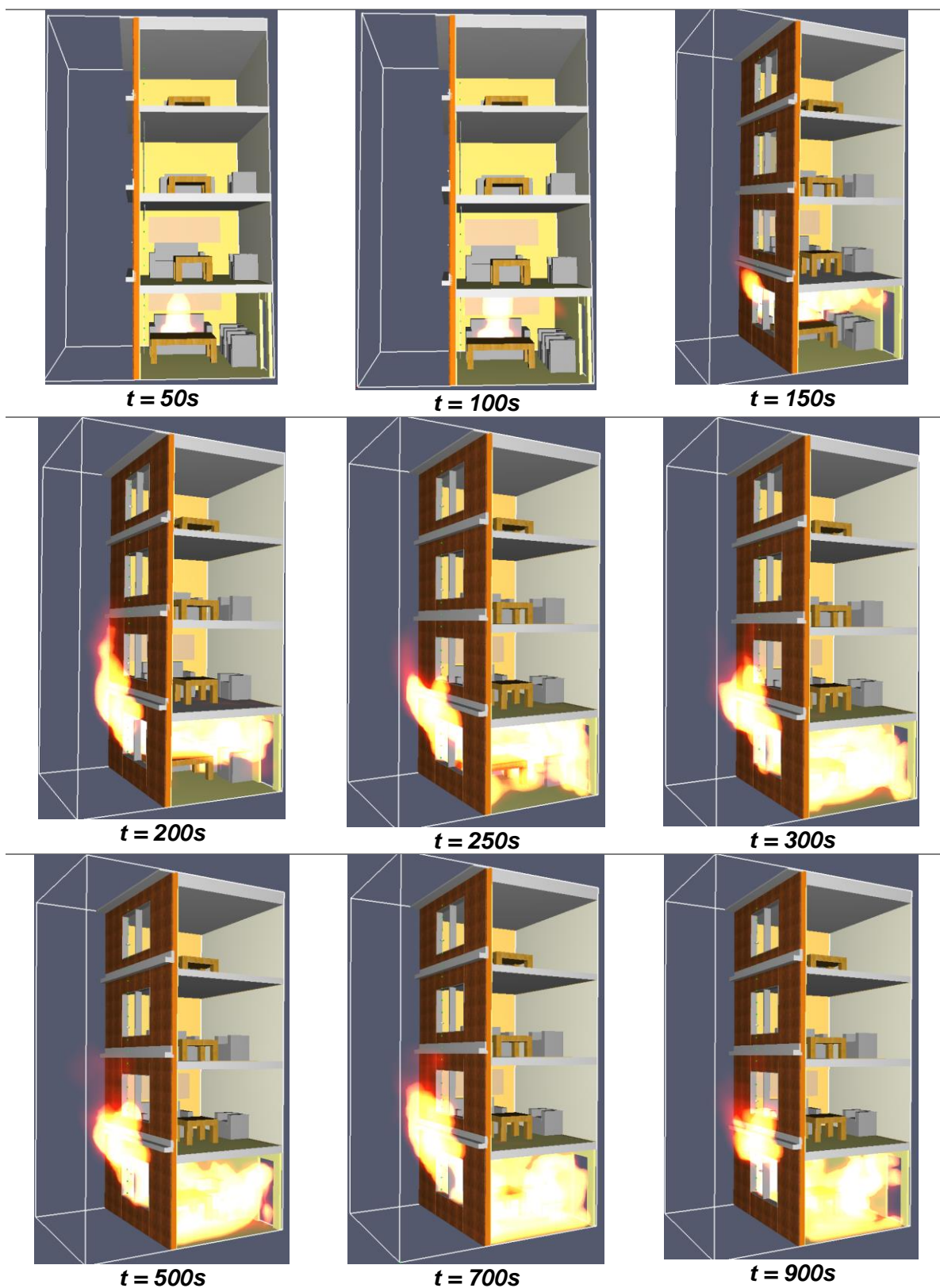


Figura 16. Detall de la franja de material no combustible en el model

En la taula d'imatges 20 es poden observar el comportament de les flames i l'evolució al llarg de l'incendi.

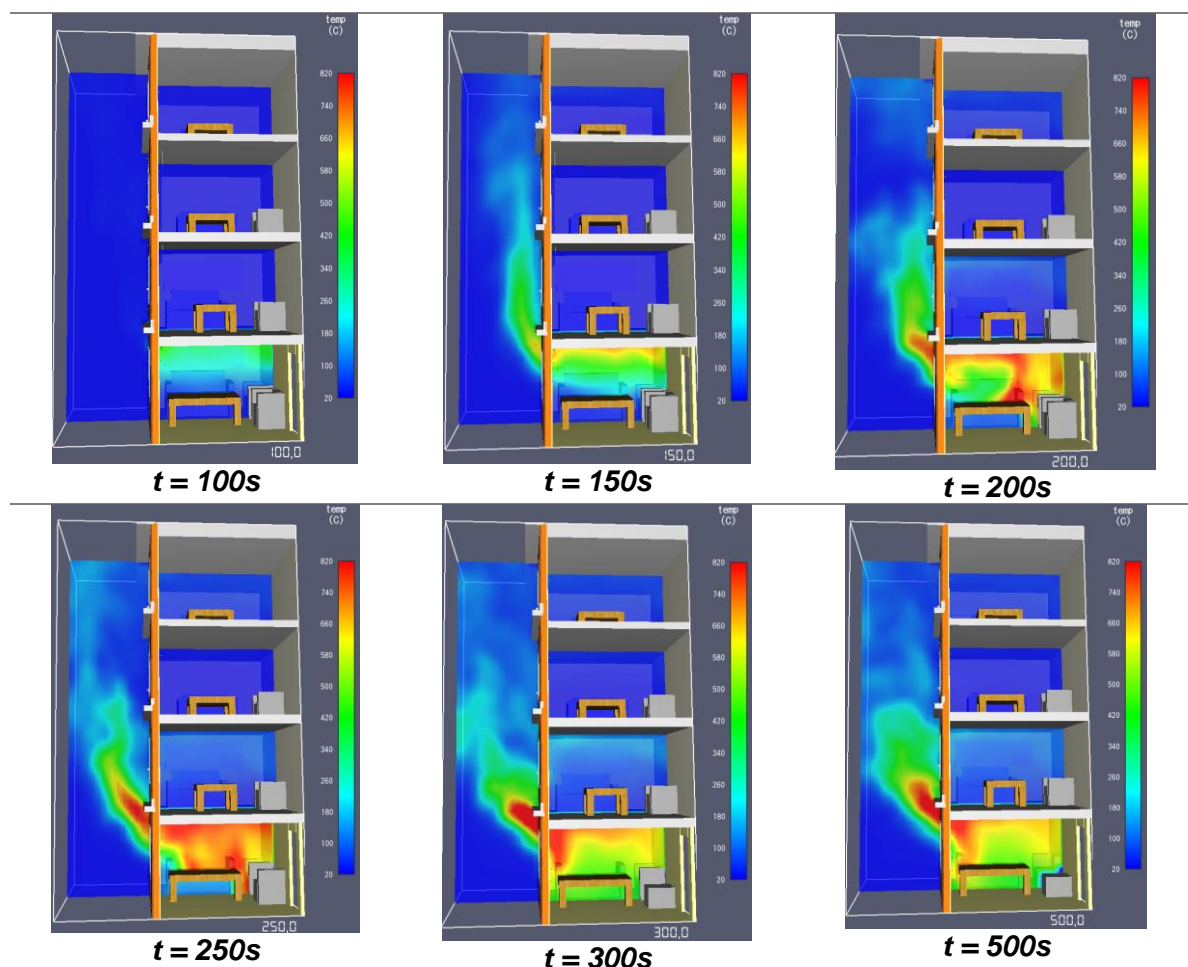


Taula 20. Simulació amb ràfec 20cm a la meitat més la franja de 20cm de material incombustible

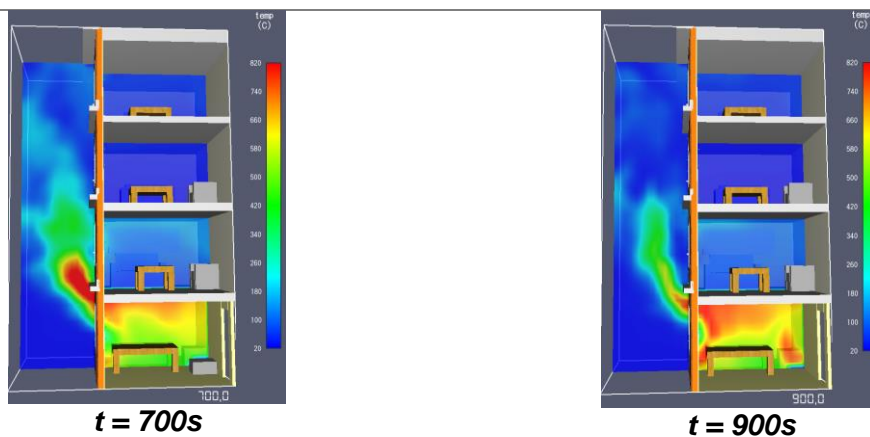
S'observa com als 150 segons, les flames ja han aconseguit sortir per la finestra de la planta baixa i en escassos 50 segons, ja han assolit l'alçada de la part superior de les

finestres del primer pis. Passats els 300 segons, les flames arriben al revestiment que hi ha en la part superior de les finestres del primer pis, lloc en el qual, durant els pròxims 200 segons sembla que es comenci a cremar, superant, així la barrera que suposa tenir unes finestres. Per contra, si el foc que sí entra dins la finestra aconsegueix propagar-se cap als elements combustibles del primer pis, s'hauria propagat cap a dins, generant una segona cambra de combustió. De totes maneres, el foc generat en la part superior no té prou força per mantenir-se i segons el programa, roman com una petita font de combustió que no s'arriba a desenvolupar en el temps de la simulació.

Els vidres del primer pis, sorprenentment són els primers a trencar-se de les simulacions dues a terme fins al moment: 155 segons. Per altra banda, però, també sorprèn que els vidres del segon i tercer pis no es trenquen. Aquest trencament tant prematur pot ser causat pel ràpid creixement que es realitza en la fase del *post-flashover*, on una simple ondulació pot afectar al detector de calor i fer trencar el vidre.

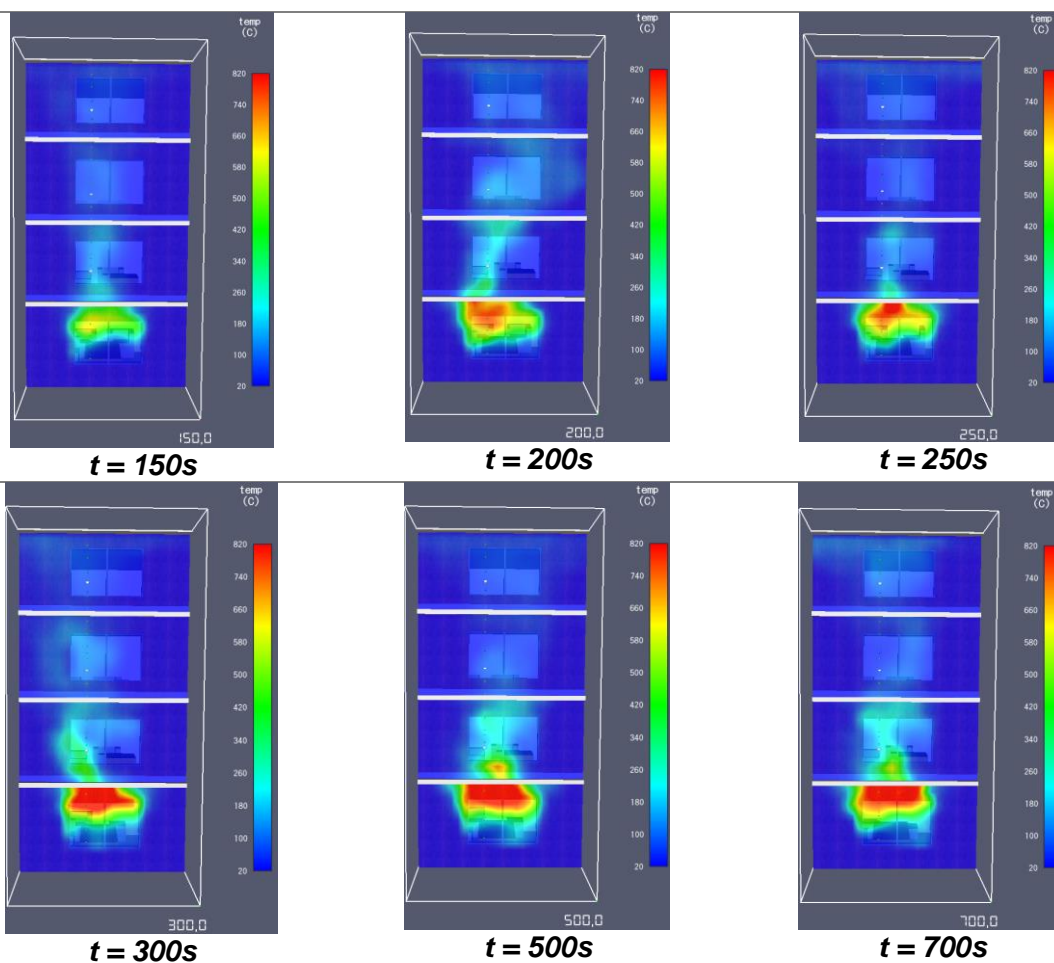


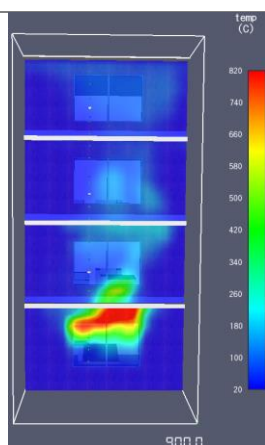




Taula 21. Simulació 20+20cm a la meitat amb projecció de temperatures en el pla perpendicular que passa pel mig de la finestra més propera a la font d'ignició

A partir de la imatge dels 200 segons de la taula 21, s'observa clarament el fenomen del *leap-frog* ja que les flames tracen una trajectòria corba un cop surten de les finestres de la planta baixa i esquiven amb molta facilitat, el ràfec de 20 cm més la franja de 20 cm en la façana de material incombustible.





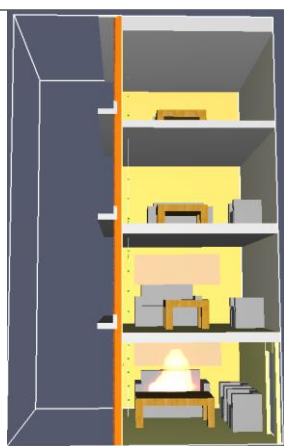
**$t = 900s$**

**Taula 22. Temperatures en la simulació 20+20cm a la meitat sobre la superfície de la façana**

Tot i això, el descens de temperatures generat per el ràfec és significatiu com mostren les imatges de la taula 22. Si a la part inferior, la superfície on les temperatures superen els 750°C és molt elevada, just per sobre el ràfec i d'una manera molt centrada, hi ha una petita franja vertical on les temperatures ronden els 400°C. Tot i que encara són temperatures extremes, la diferència de temperatures és de 350°C aproximadament.

### 2.6.6. Ràfec de 40+20 centímetres en la meitat

També s'ha volgut realitzar una simulació amb la franja de 20cm per sobre el ràfec de material incombustible però en aquest cas, afegint 20 cm més d'amplada a al ràfec, ja que els resultats obtinguts demostren una bona tendència pel que fa al salt tèrmic que es produeix quan només hi ha un ràfec de 20 cm (apartat 2.6.1) i un de les mateixes dimensions amb l'afegit de la franja superior. En la taula d'imatges 23 se'n poden veure els resultats.



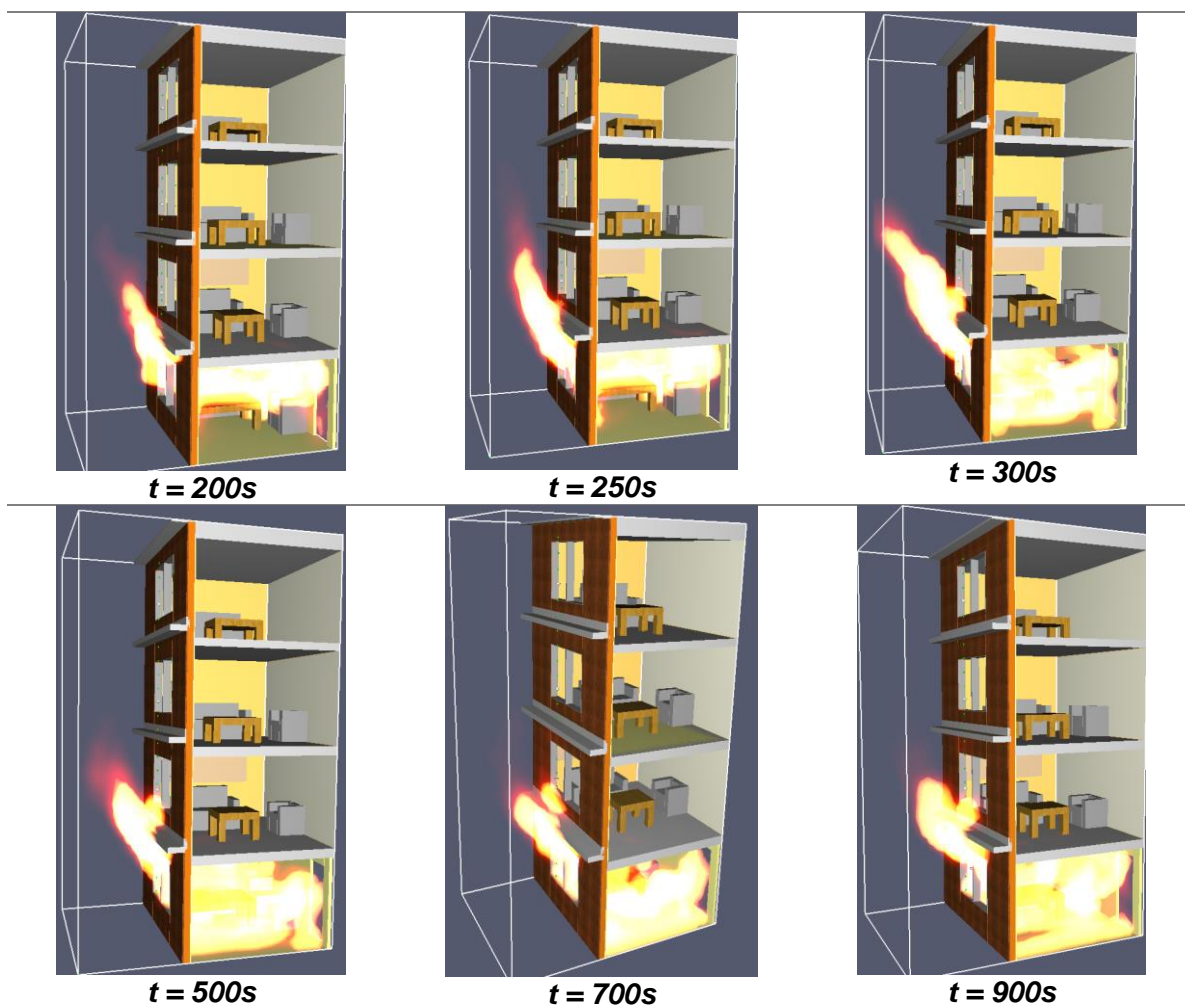
**$t = 50s$**



**$t = 100s$**



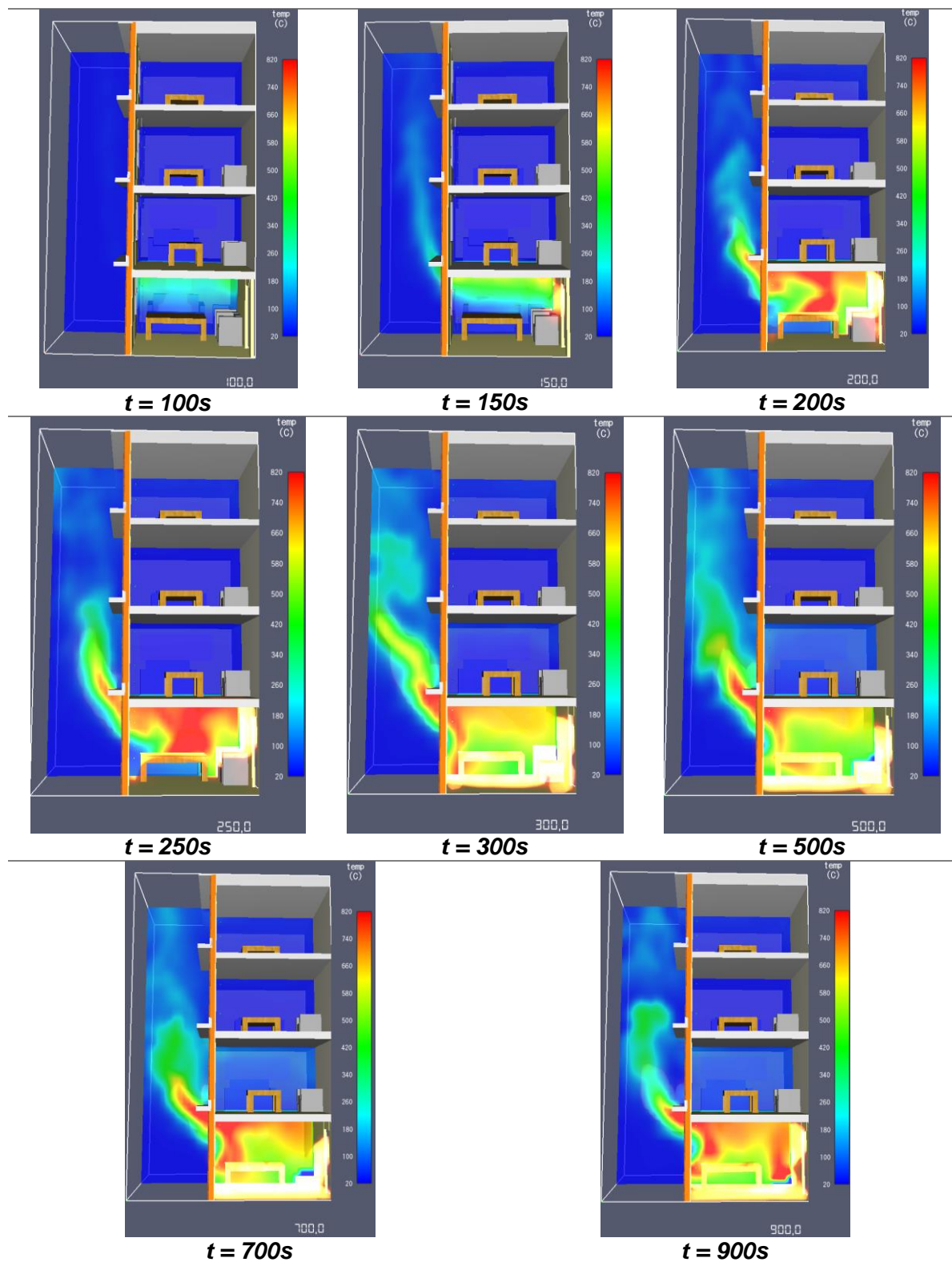
**$t = 150s$**



Taula 23. Simulació amb ràfec 40cm a la meitat més la franja de 20cm de material incombustible

S'observa que el comportament de l'incendi és el mateix que en el apartat 2.6.2 durant els primers 200 segons. En aquest cas, però, no és fins als 290 segons que les flames comencen a cremar el revestiment superior del ràfec i ho fa per sobre de la franja incombustible, com era d'esperar. Produït, llavors, el *leap-frog* les flames assoleixen un estat d'estancament ja que no són capaces de propagar-se cap a la part inferior de la següent llinda.

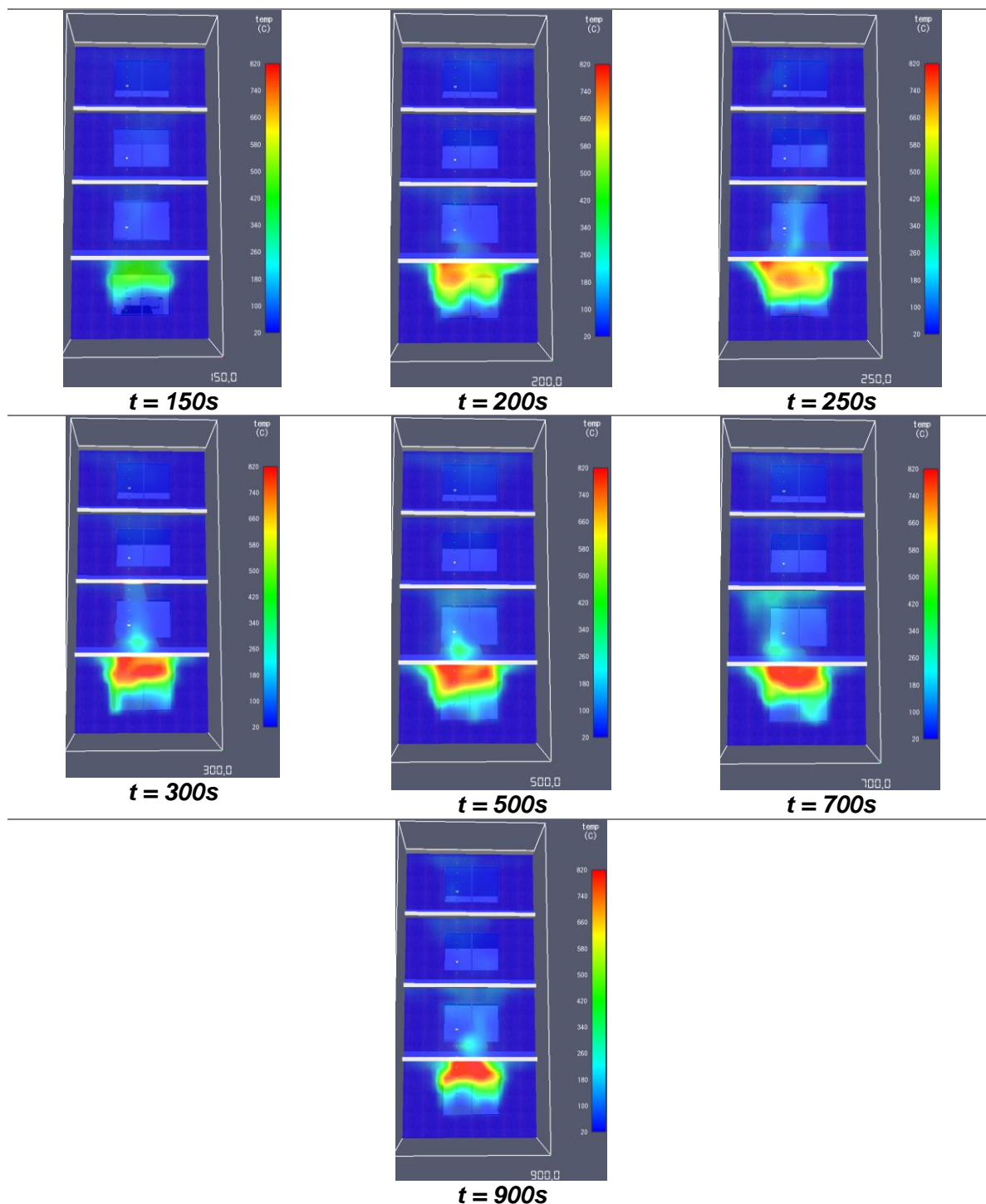
Els vidres del primer pis es trenquen als 280 segons, mentre que els del segon i tercer pis no s'arriben a trencar mai.



Taula 24. Simulació 40+20cm a la meitat amb projecció de temperatures en el pla perpendicular que passa pel mig de la finestra més propera a la font d'ignició



Tal i com es pot observar en la taula de figures 24, el fenomen del *leap-frog* és produïx d'una manera menys agressiva que en anteriors simulacions ja que la temperatura de les flames és menor en el revestiment superior del ràfec.



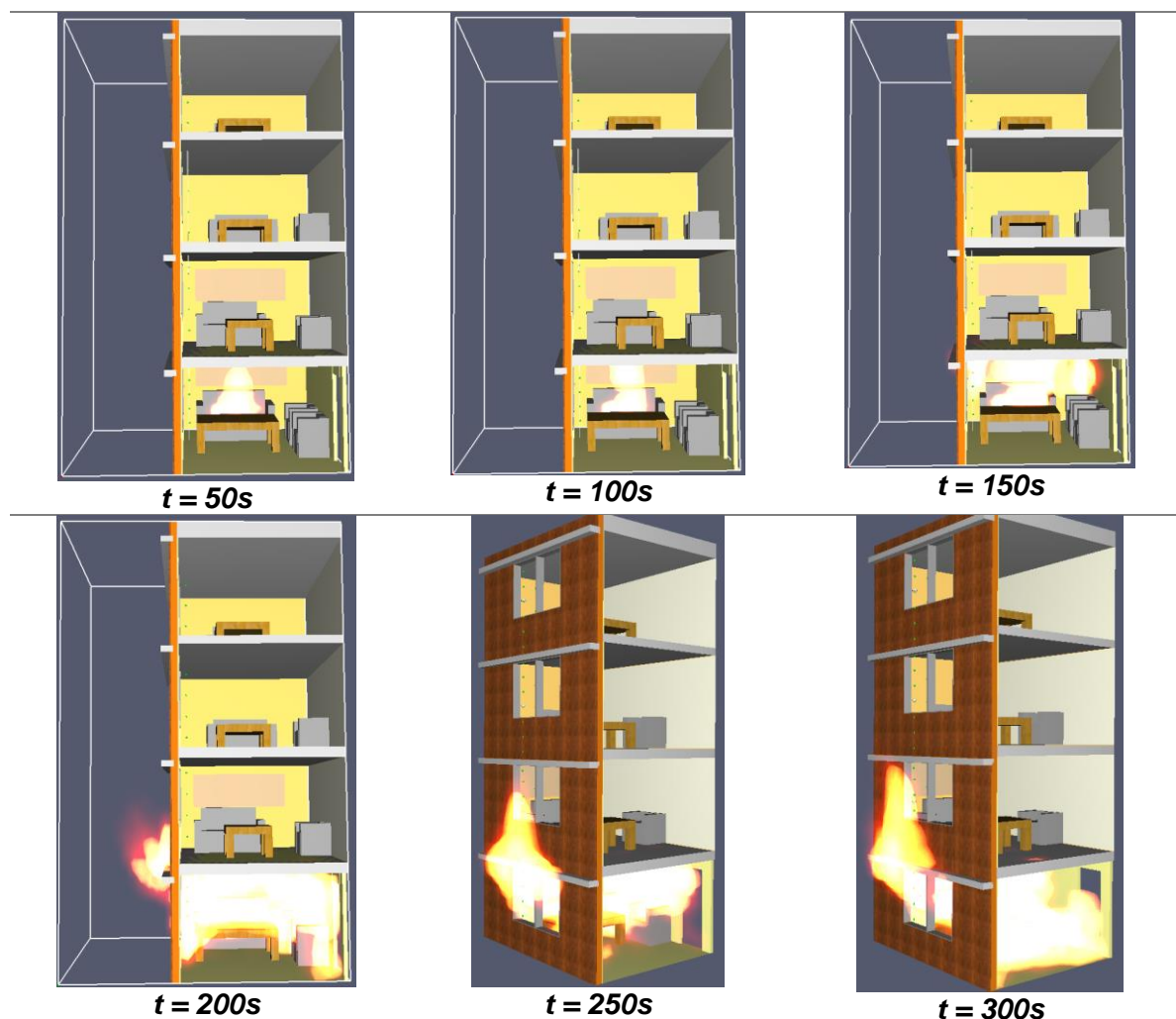
Taula 25. Temperatures en la simulació 40+20cm a la meitat sobre la superfície de la façana

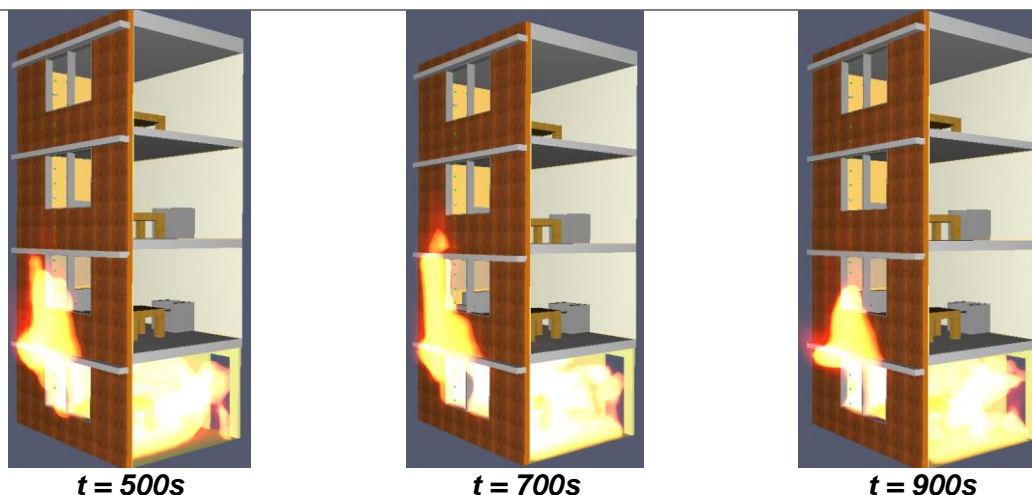
En les imatges de la taula 25, s'observa la diferència de temperatures a partir del segon 250 és molt més gran ja que es passa d'uns 800°C a la superfície de la façana, a uns

300°C aproximats, és a dir 500°C de diferència. També val a dir que la superfície on s'assoleixen aquests 300°C és menor en comparació al cas 2.6.2, que no té la franja.

### 2.6.7. Ràfec de 20 centímetres tocant la llinda

Un cop fetes les simulacions que tenen material combustible en la part inferior del ràfec, és el torn de les que tenen els ràfecs situats a una cota inferior. En la taula d'imatges 26, es pot observar l'evolució de l'incendi quan el ràfec és de només 20cm i tocant la llinda de la finestra.



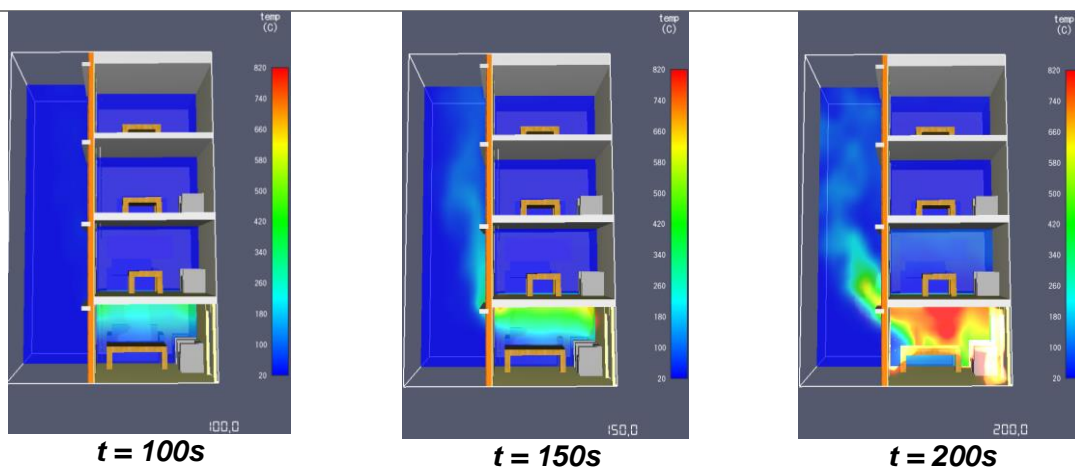


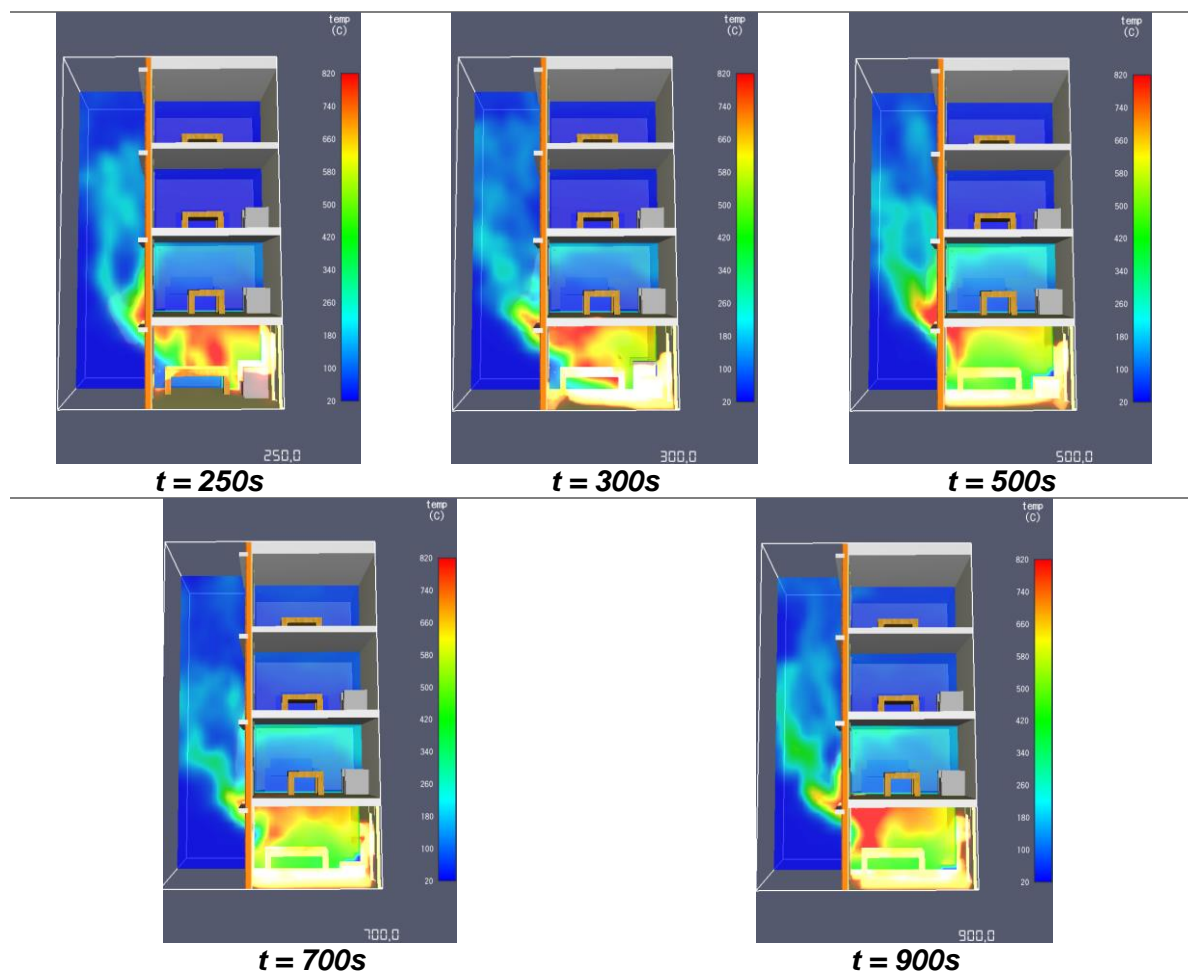
Taula 26. Simulació amb ràfec 20cm tocant la llinda

Com succeeix amb totes les simulacions, les fases de d'ignició, creixement i *flashover* succeeixen pràcticament igual. Entre les imatges dels 150 als 200 segons es pot observar com les flames superen amb facilitat l'obstacle del ràfec i arriben amb facilitat al travesser inferior de la finestra del primer pis. En els propers 100 segons, aquestes assoleixen la part inferior del ràfec que hi ha entre el primer i segon pis, fent intents d'entrar dins el recinte.

En la imatge dels 500 segons, l'incendi comença a propagar-se per sobre del segon ràfec degut a que les flames pugen per la part esquerra de la finestra. Posteriorment, als 700 segons, s'observa com el foc encara es manté a l'altra màxima, però a partir de llavors, decau fins a assolir una altura similar a la meitat de la finestra del primer pis.

Les finestres del primer pis trenquen als 170 segons, les del segon als 520 segons i les del tercer romanen intactes.

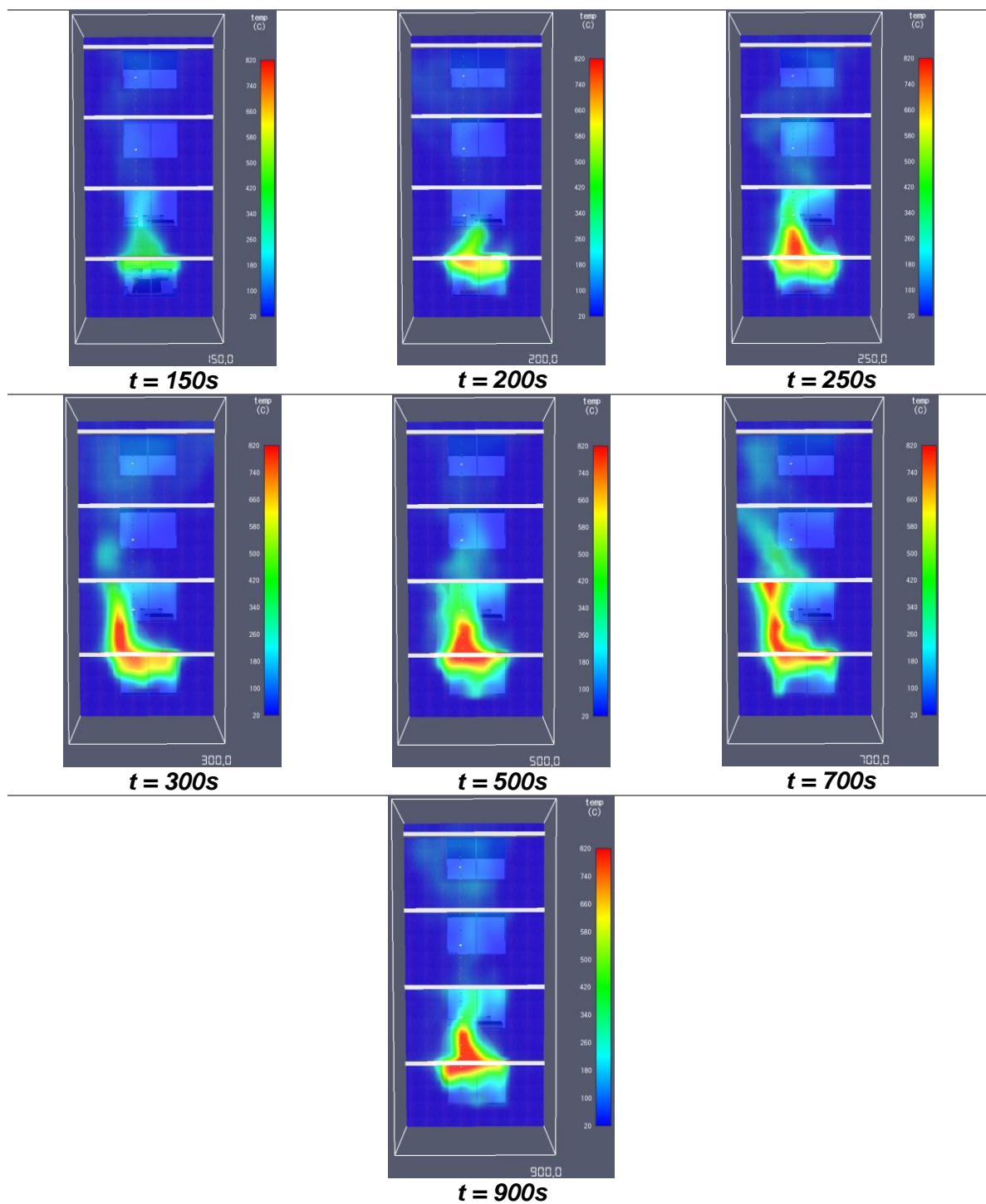




Taula 27. Simulació 20cm tocant la llinda amb projecció de temperatures en el pla perpendicular que passa pel mig de la finestra més propera a la font d'ignició

En la taula de figures 27, es pot observar com el *leap-frog* es produeix amb molta facilitat ja que la combinació de la gran càrrega de combustió que porta l'incendi en el *post-flashover* més la gran distància superior de material combustible que existeix entre el ràfec i la finestra del primer pis, fa que la propagació sigui més ràpida que en altres casos.

Aquest fet també es pot observar en la taula d'imatges 28, on la diferència de temperatures és pràcticament nul·la, encara que sí s'observa com la superfície disminueix quan les flames han superat el ràfec durant els primers 300 segons. Un cop les flames aconseguixen cremar la part esquerra del primer pis ( $t=500s$ ), aquesta superfície adquireix una magnitud major, fins el decaïment dels 900 segons.



Taula 28. Temperatures en la simulació 20cm tocant la llinda sobre la superfície de la façana

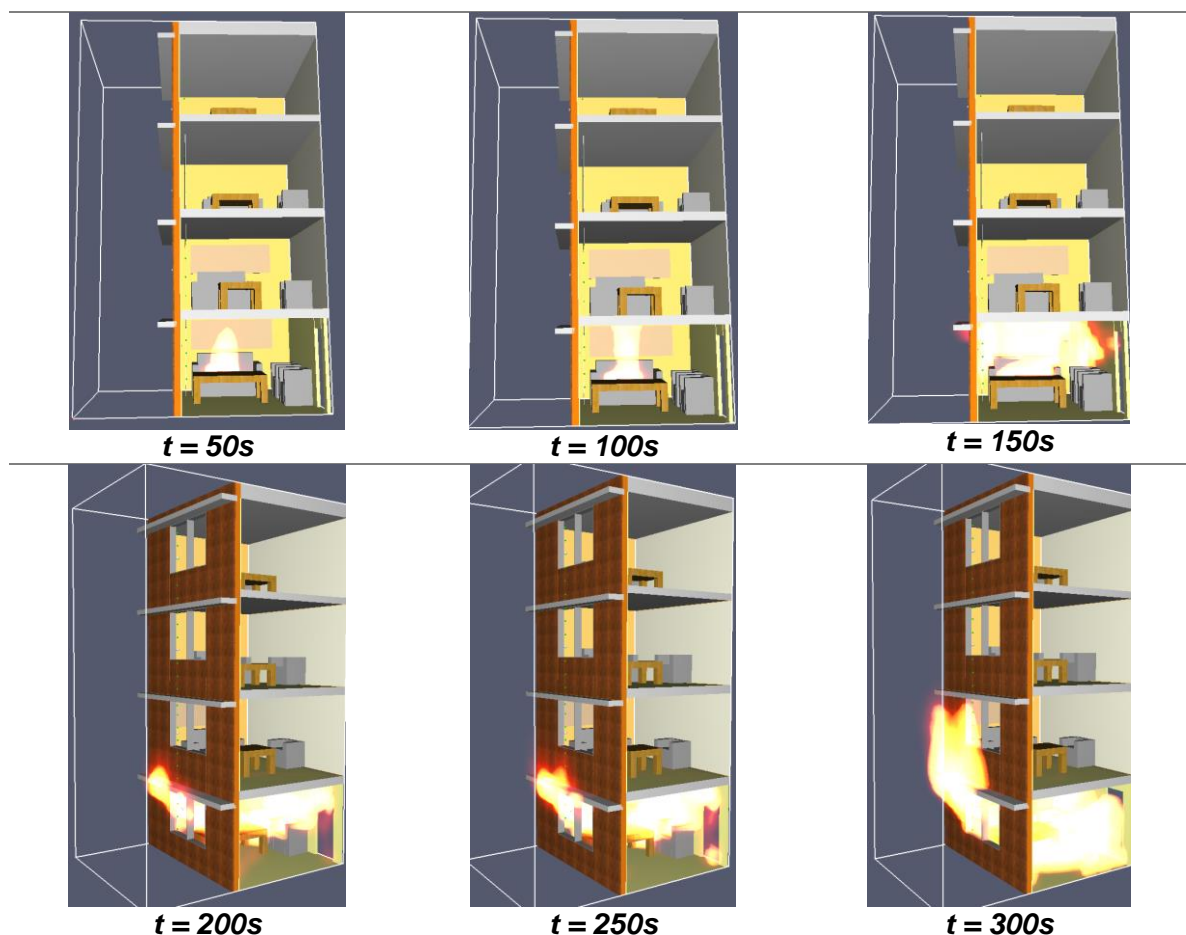
### 2.6.8. Ràfec de 40 centímetres tocant la llinda

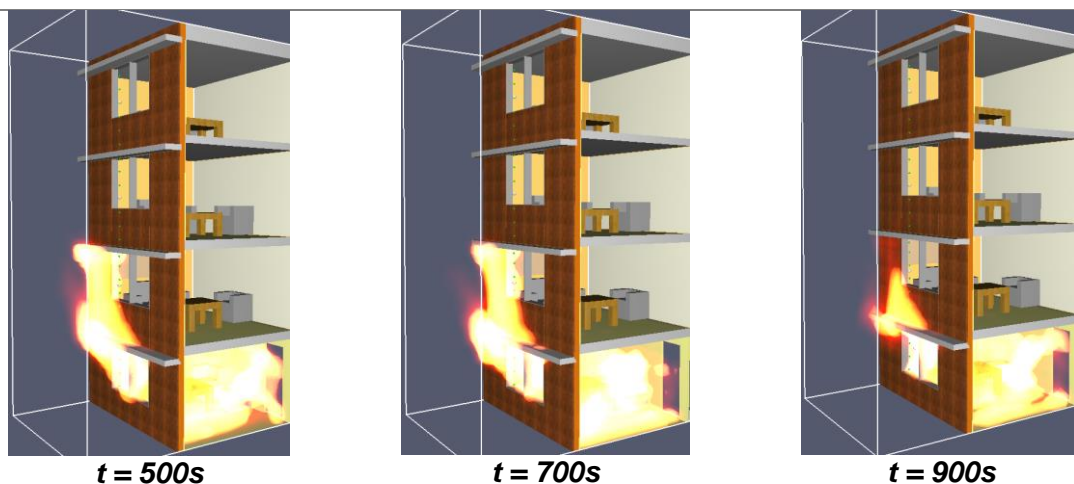
Afegint 20cm a al ràfec, s'observa en la taula d'imatges 29, com a l'incendi li costa uns segons més el propagar-se cap a cotes superiors a la del ràfec. Als 250 segons ja s'ha iniciat un petit focus en la part superior del ràfec que es propaga ràpidament pel



revestiment. Posteriorment, l'incendi segueix el mateix patró observat en l'apartat anterior de desviar la seva trajectòria cap a l'esquerra de la finestra on està ple de revestiment de fusta fins arribar a la part inferior del segon ràfec. En aquest punt s'observa que a l'incendi pot penetrar sense problemes al primer pis, ja que el ràfec està per sota del sostre del recinte. Durant els pròxims 200 segons, l'incendi segueix guanyant força encara que és incapaç de superar el segon ràfec. Finalment, com en la simulació anterior, en el tram final de la simulació aquest comença a patir unes oscil·lacions en l'altura de les flames i acaba en una altura similar a la simulació amb 20 cm.

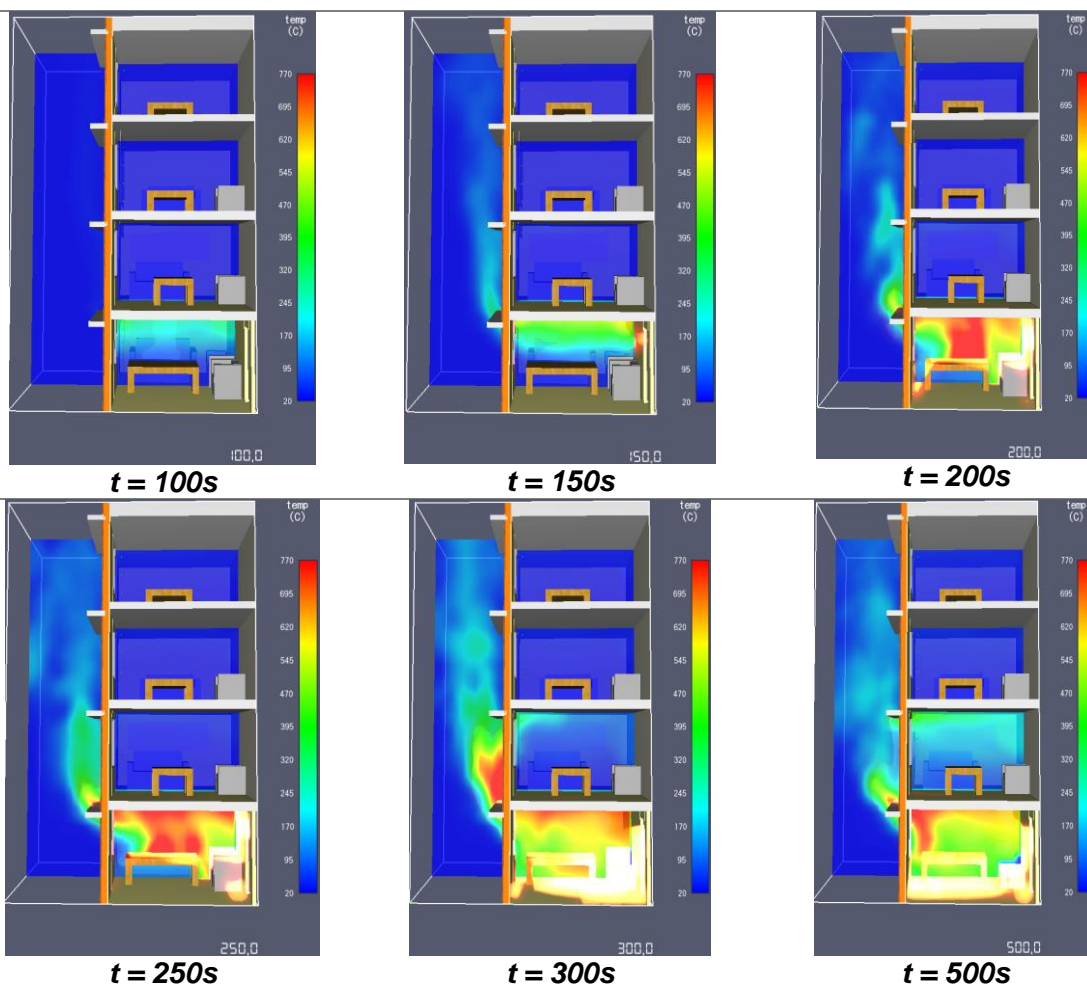
Els vidres del primer pis es trenquen als 290 segons, mentre que els dels pisos superiors no ho arriben a fer.

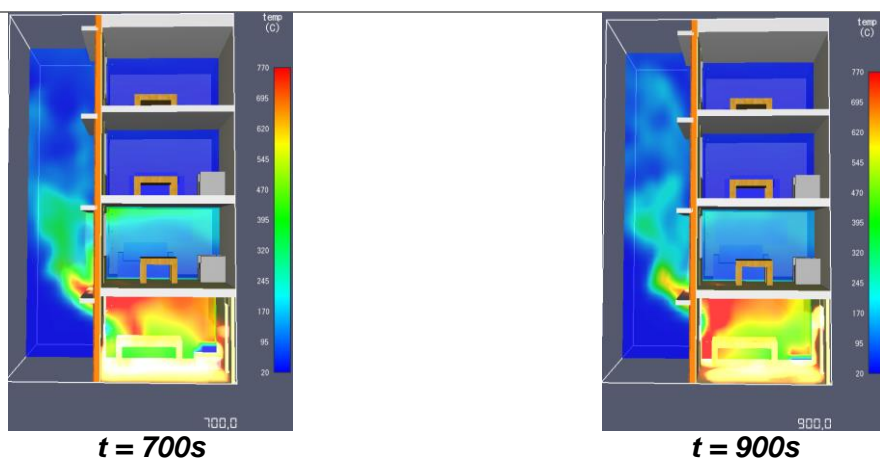




Taula 29. Simulació amb ràfec 40cm tocant la llinda

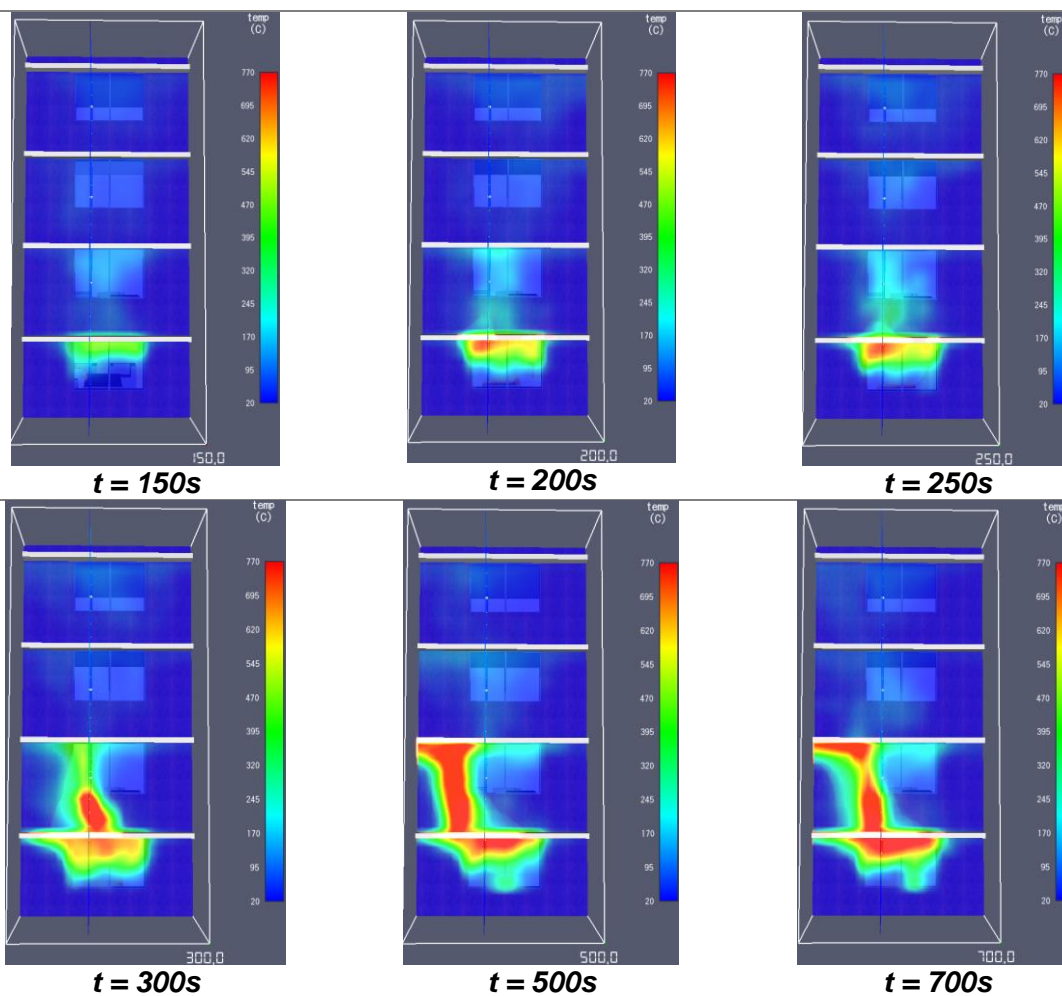
L'efecte del *leap-frog* es pot observar clarament en les imatges de la taula 30, on les temperatures interiors del primer pis poden assolir els 400°C, probablement, facilitades per la geometria de l'espai: el segon ràfec facilita que les flames entrin al primer pis.



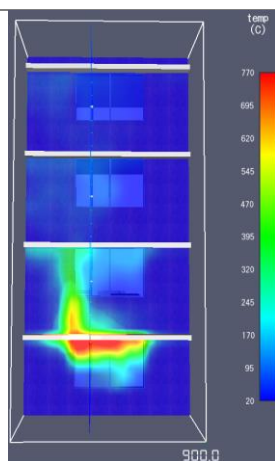


Taula 30. Simulació 40cm tocant la llinda amb projecció de temperatures en el pla perpendicular que passa pel mig de la finestra més propera a la font d'ignició

Pel que fa a la temperatura superficial de la façana, s'observa molt clarament com l'incendi cerca noves vies per propagar-se, tal i com es pot observar a partir dels 300 segons en la taula d'il·lustracions 31.







**$t = 900s$**

**Taula 31. Temperatures en la simulació 40cm tocant la llinda sobre la superfície de la façana**

### 2.6.9. Ràfec de 60 centímetres tocant la llinda

En la taula de figures 32, es pot observar com les flames els hi costa molt més superar el ràfec. Als 300 segons s'observa com les flames comencen a incendiar el revestiment immediatament superior del ràfec, encara que es podria tractar d'un efecte òptic provocat pel programa donades les altes temperatures que s'assoleixen a la part inferior. Tot i això, fins 200 segons més tard, les flames no aconsegueixen cremar el revestiment de fusta. A partir d'aquest moment, l'incendi s'estabilitza i amb prou feines arriba al travesser inferior de la finestra del primer pis. Com a conseqüència d'això, cap dels vidres dels pisos superiors arriben a cremar.



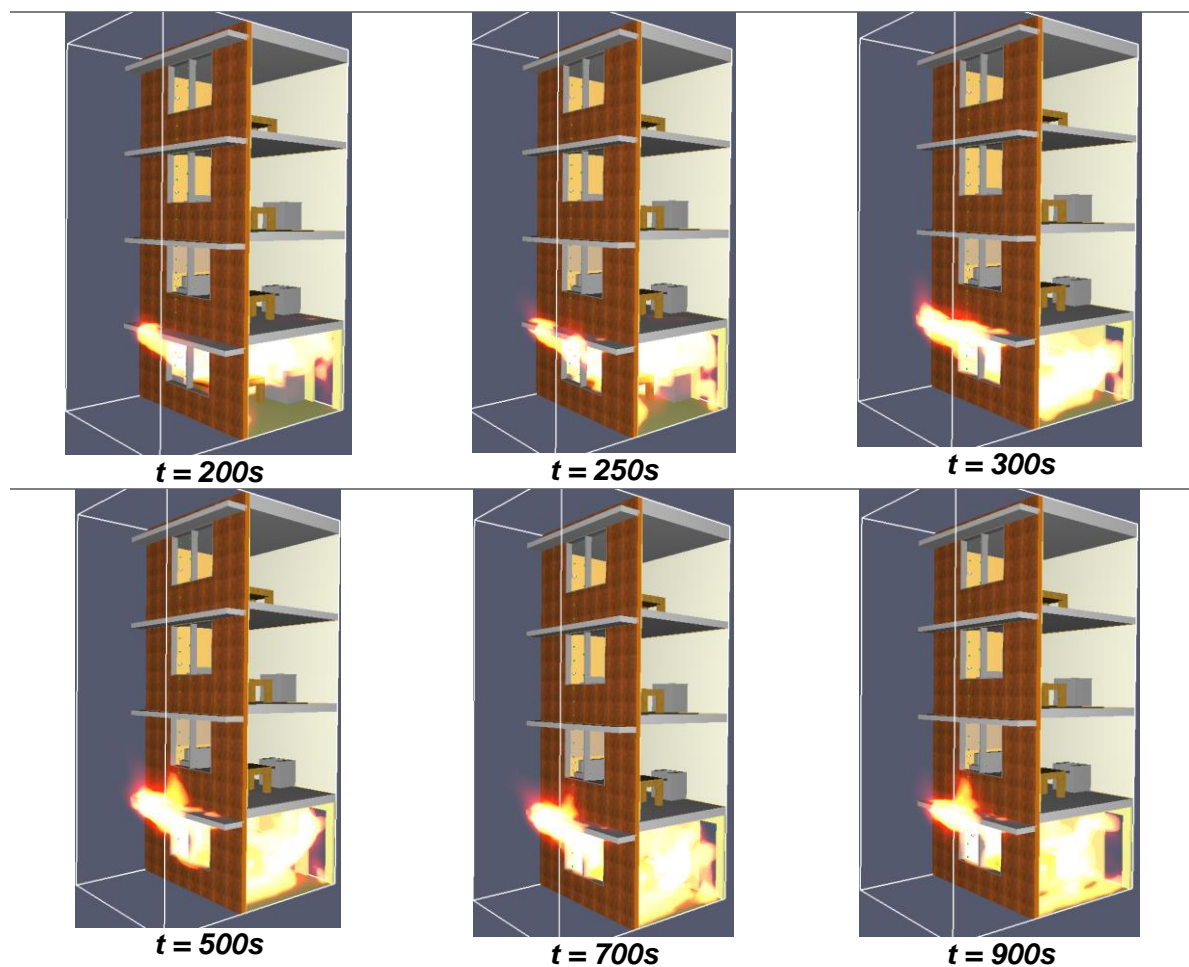
**$t = 50s$**



**$t = 100s$**

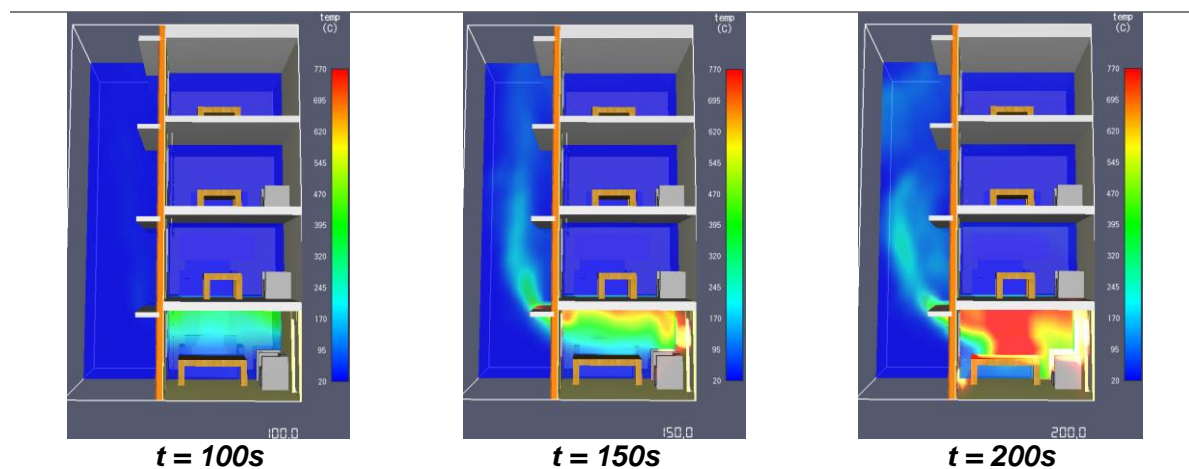


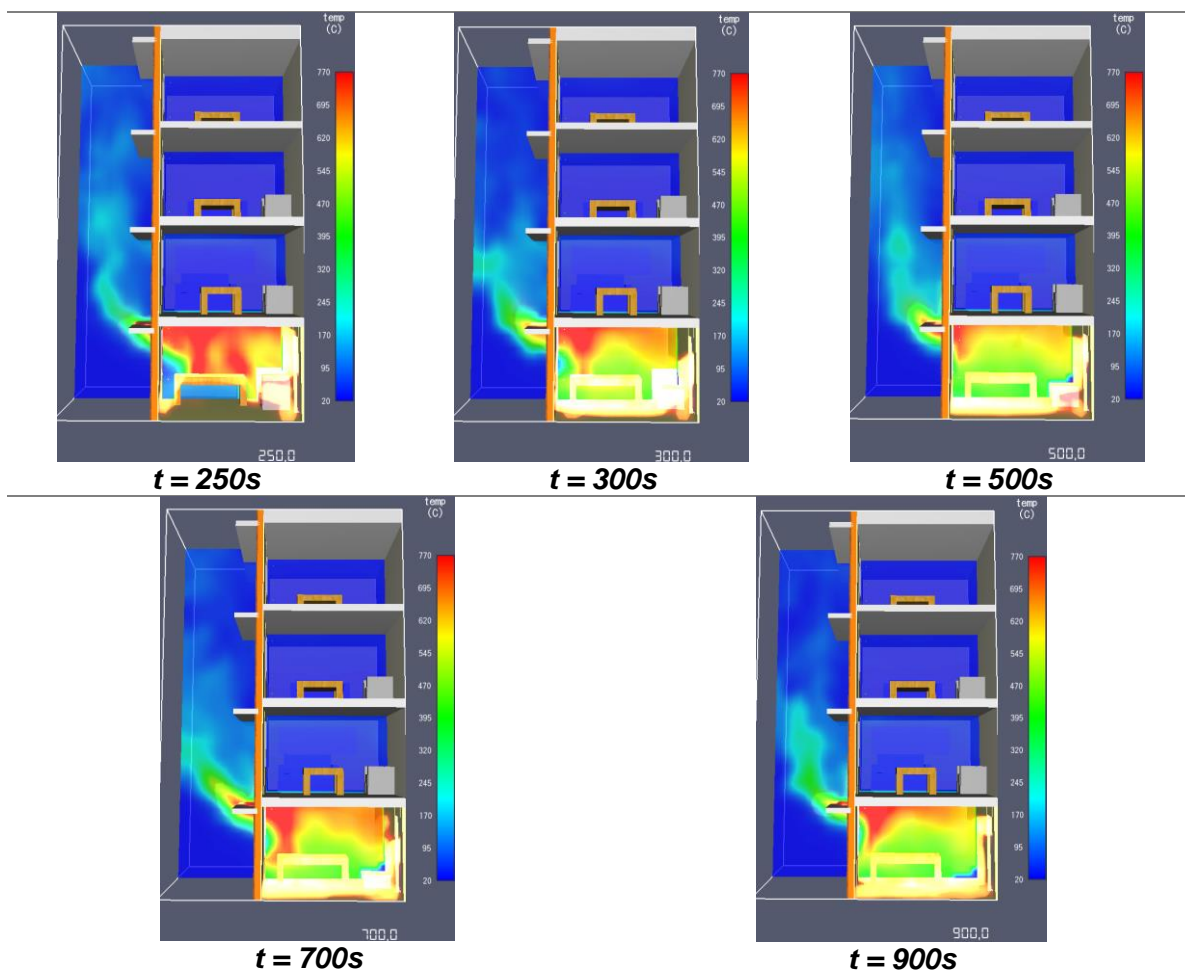
**$t = 150s$**



Taula 32. Simulació amb ràfec 60cm tocant la llinda

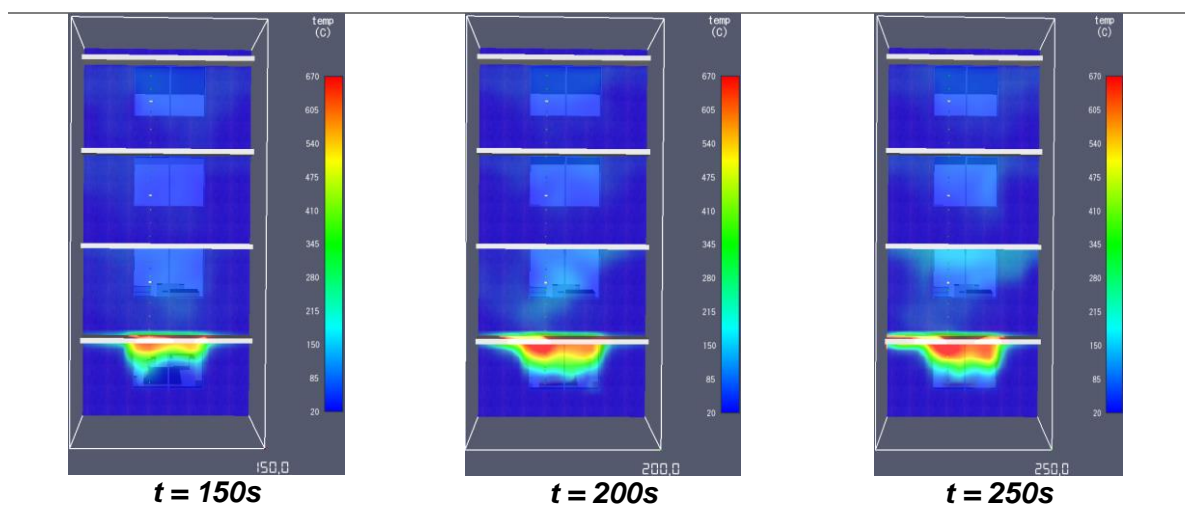
En aquest cas no s'observa clarament que es produeixi el *leap-frog*, sinó que és més un efecte de les altes temperatures que afecten al revestiment de fusta i l'acaben incendiant, tal i com es pot observar en la taula d'imatges 33.

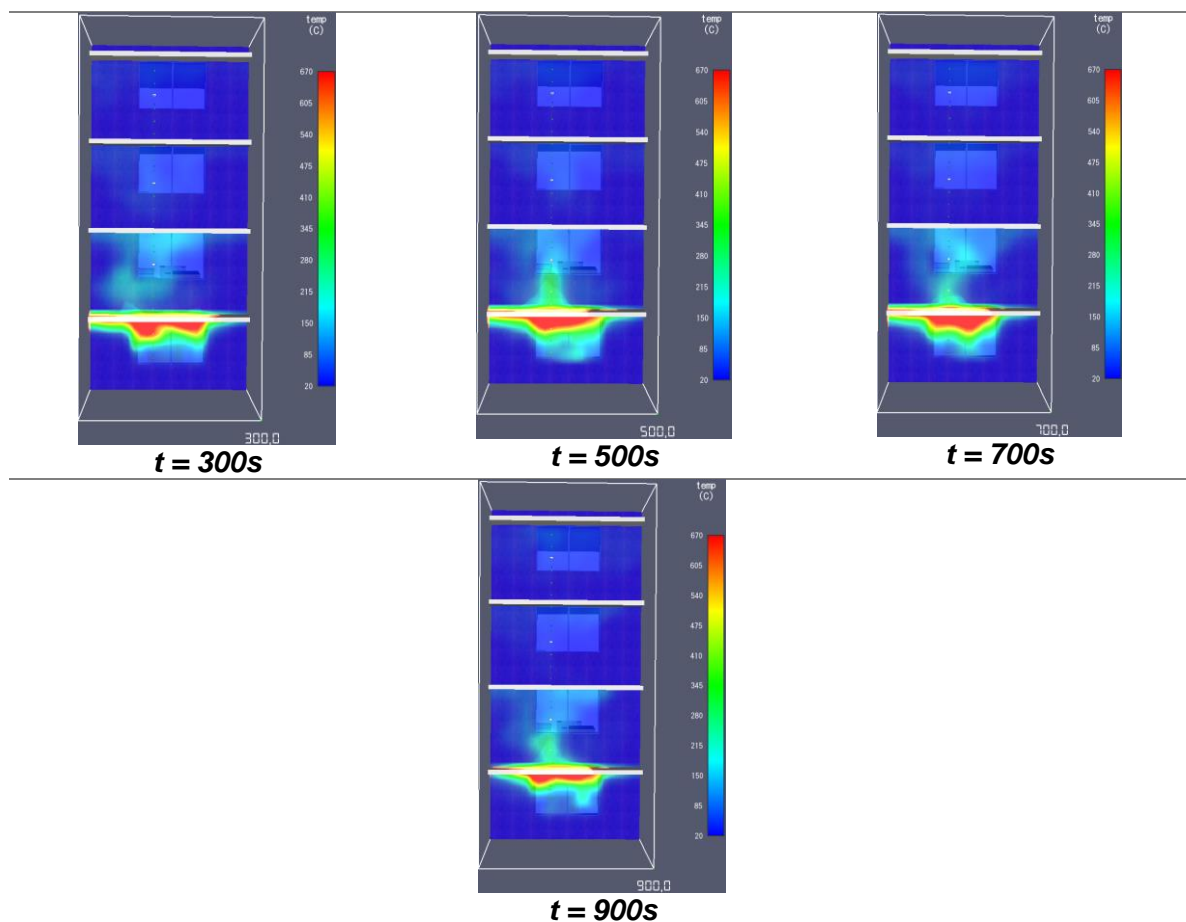




Taula 33. Simulació 60cm tocant la llinda amb projecció de temperatures en el pla perpendicular que passa pel mig de la finestra més propera a la font d'ignició

És per això que la diferència de temperatures enregistrades a la superfície de la façana és de l'ordre de 500°C com es pot observar en les imatges de la taula 34.

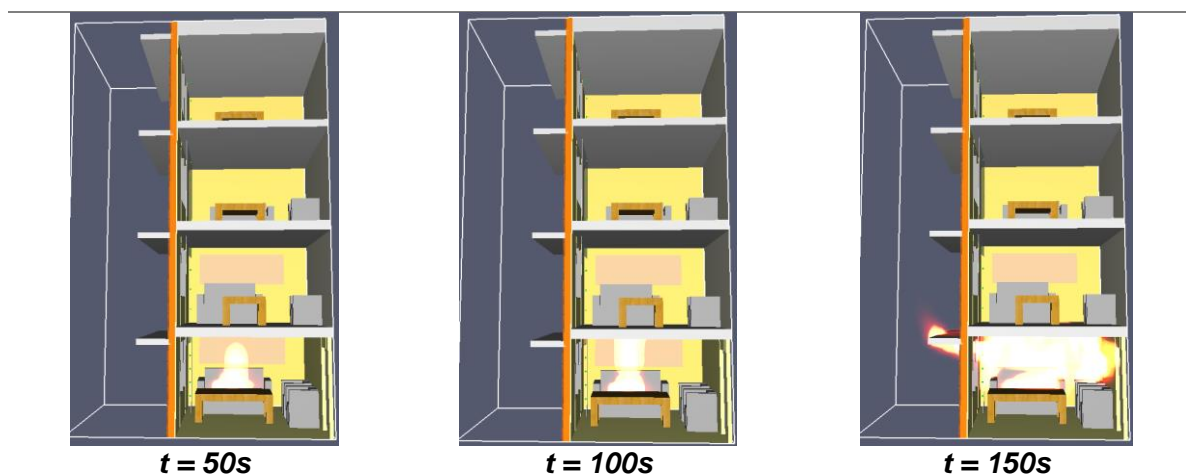




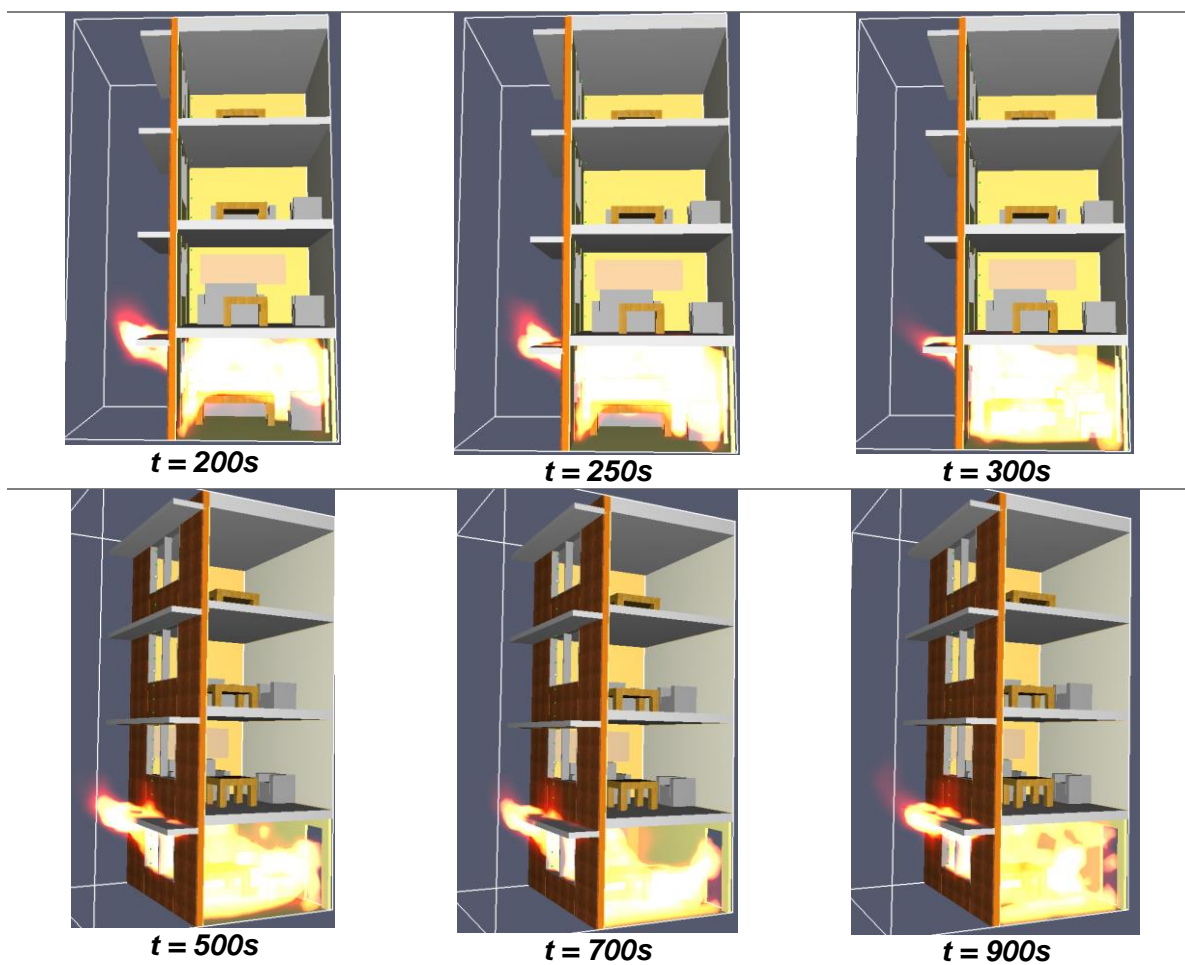
Taula 34. Temperatures en la simulació 60cm tocant la llinda sobre la superfície de la façana

### 2.6.10. Ràfec de 80 centímetres tocant la llinda

Si l'efecte de l'amplitud del ràfec és efectiu amb 60cm, en aquest cas, l'efecte es major encara. Com en el cas 2.6.4, les flames són incapaces de superar el ràfec i el resultat és el que es pot observar en la taula 35.



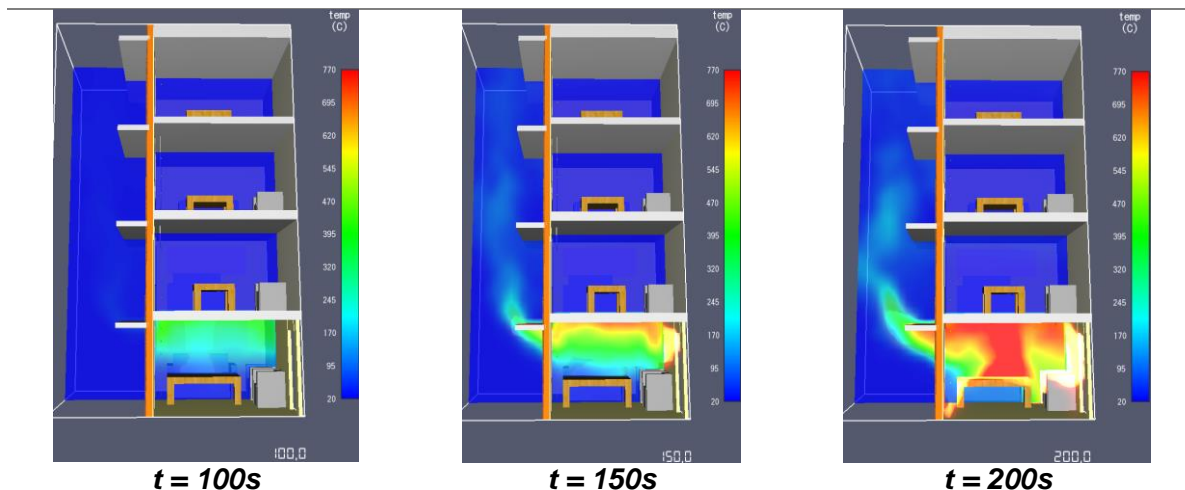


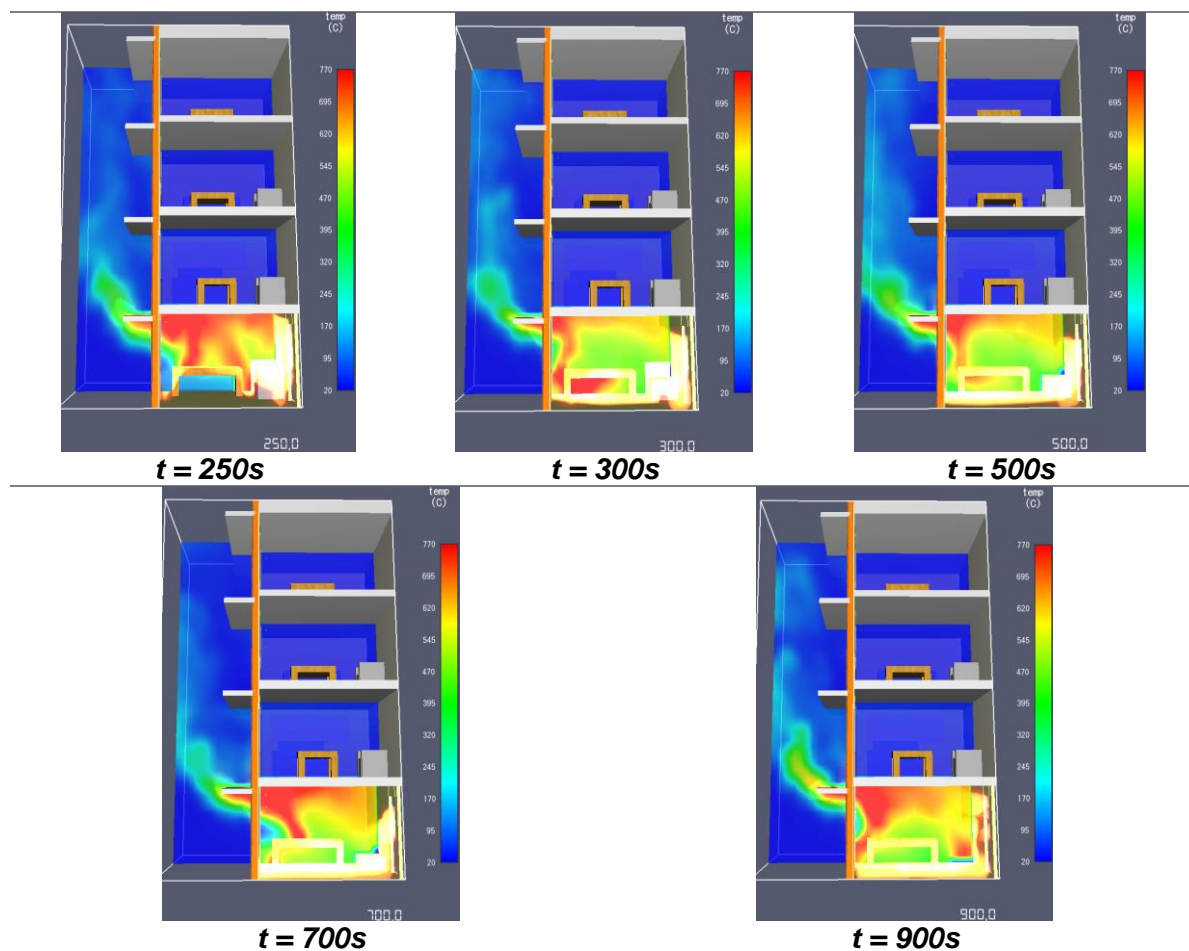


Taula 35. Simulació amb ràfec 80cm tocant la llinda

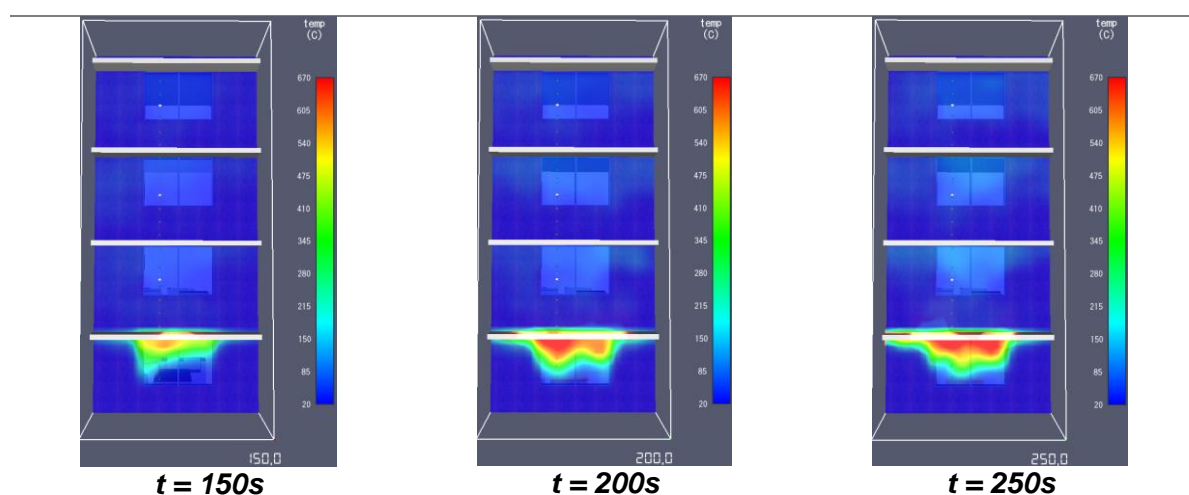
Els vidres dels pisos superiors no es veuen afectats tampoc

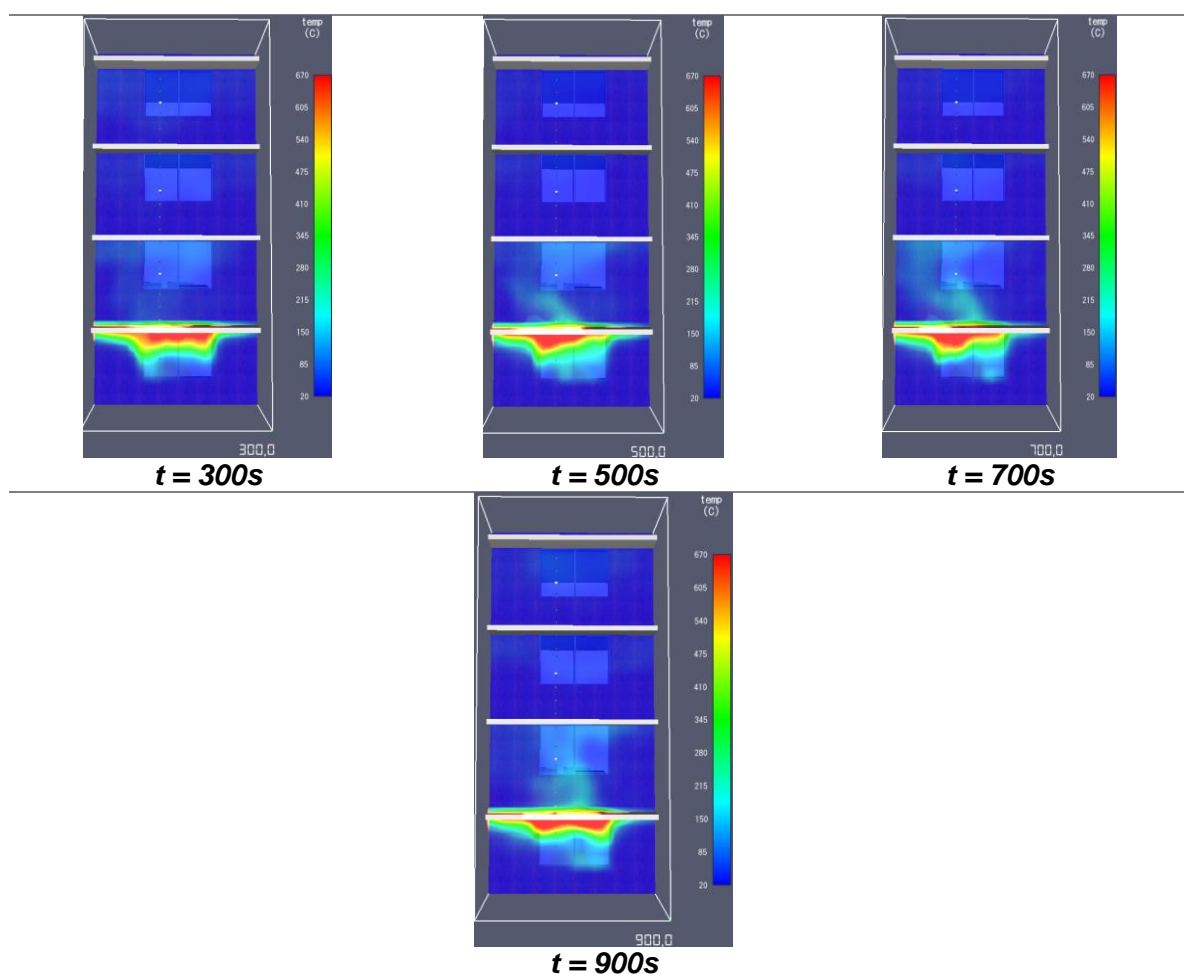
S'elimina totalment l'efecte del *leap-frog*, com es pot apreciar en la taula 36, i no és fins a instants finals de la simulació, que no es detecta un increment de temperatures subtil a la superfície de la façana com es pot veure en la taula 37.





Taula 36. Simulació 80cm tocant la llinda amb projecció de temperatures en el pla perpendicular que passa pel mig de la finestra més propera a la font d'ignició





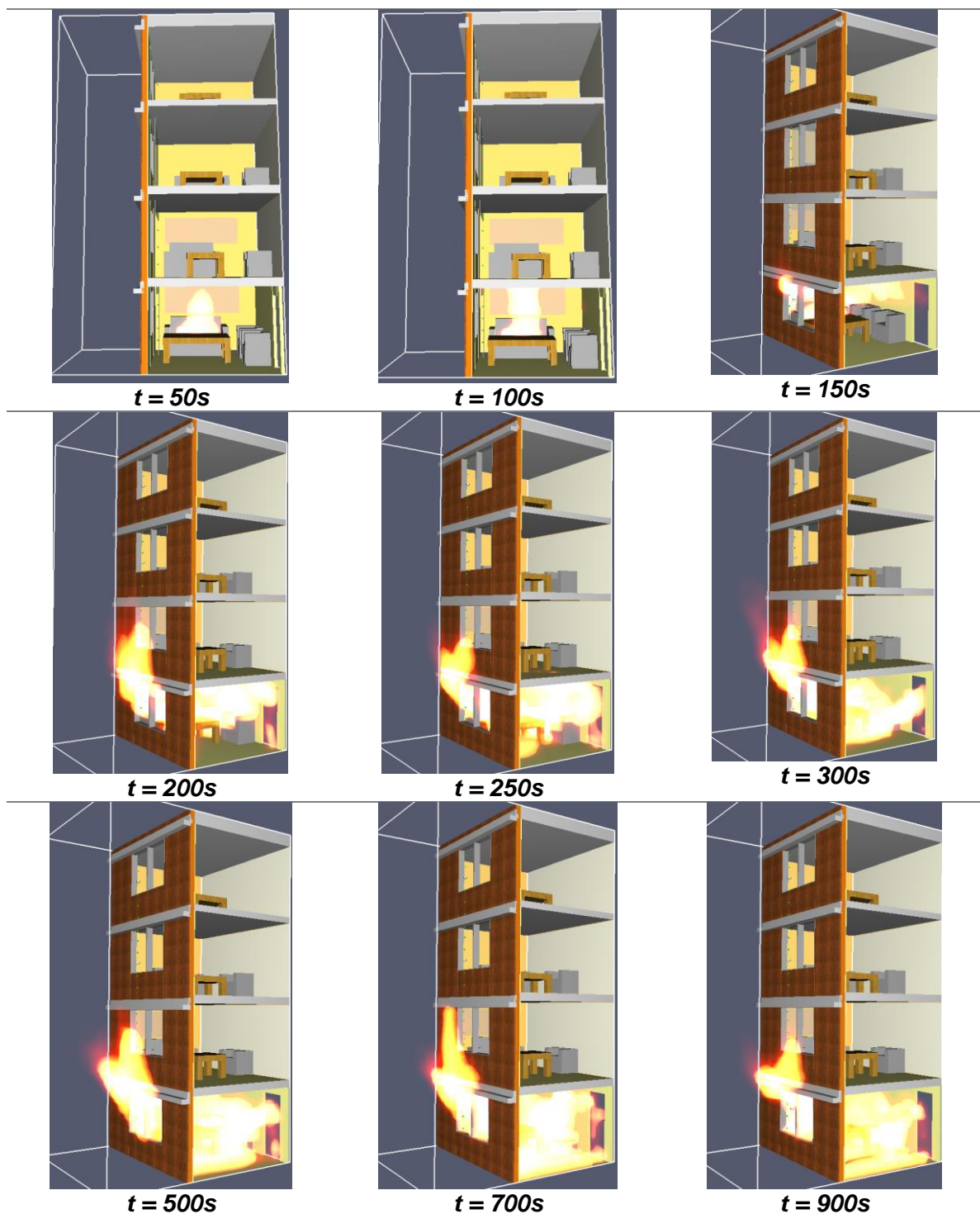
Taula 37. Temperatures en la simulació 80cm tocant la llinda sobre la superfície de la façana

### 2.6.11. Ràfec de 20+20 centímetres tocant la llinda

Seguint la mateixa metodologia per a la col·locació del ràfec a la meitat, es procedeix a afegir una franja de material incombustible just a sobre del ràfec.

L'efecte de la franja no resulta de molta ajuda en el fre de la propagació a través del primer ràfec, ja que, als 200 segons, les flames ja han assolit l'altura de les finestres del primer pis, com es pot veure en la taula 38. A partir de llavors segueixen el mateix comportament de l'apartat 2.6.7 on les flames es col·loquen a l'esquerra de les finestres. L'efecte de la franja sí que es pot apreciar en la propagació del segon ràfec, on mai arriben a cremar per sobre d'aquest, com si ho feia en el model sense la franja (apartat 2.6.7). Finalment, succeeix la mateixa davallada de l'altura de les flames en la part final de la simulació.

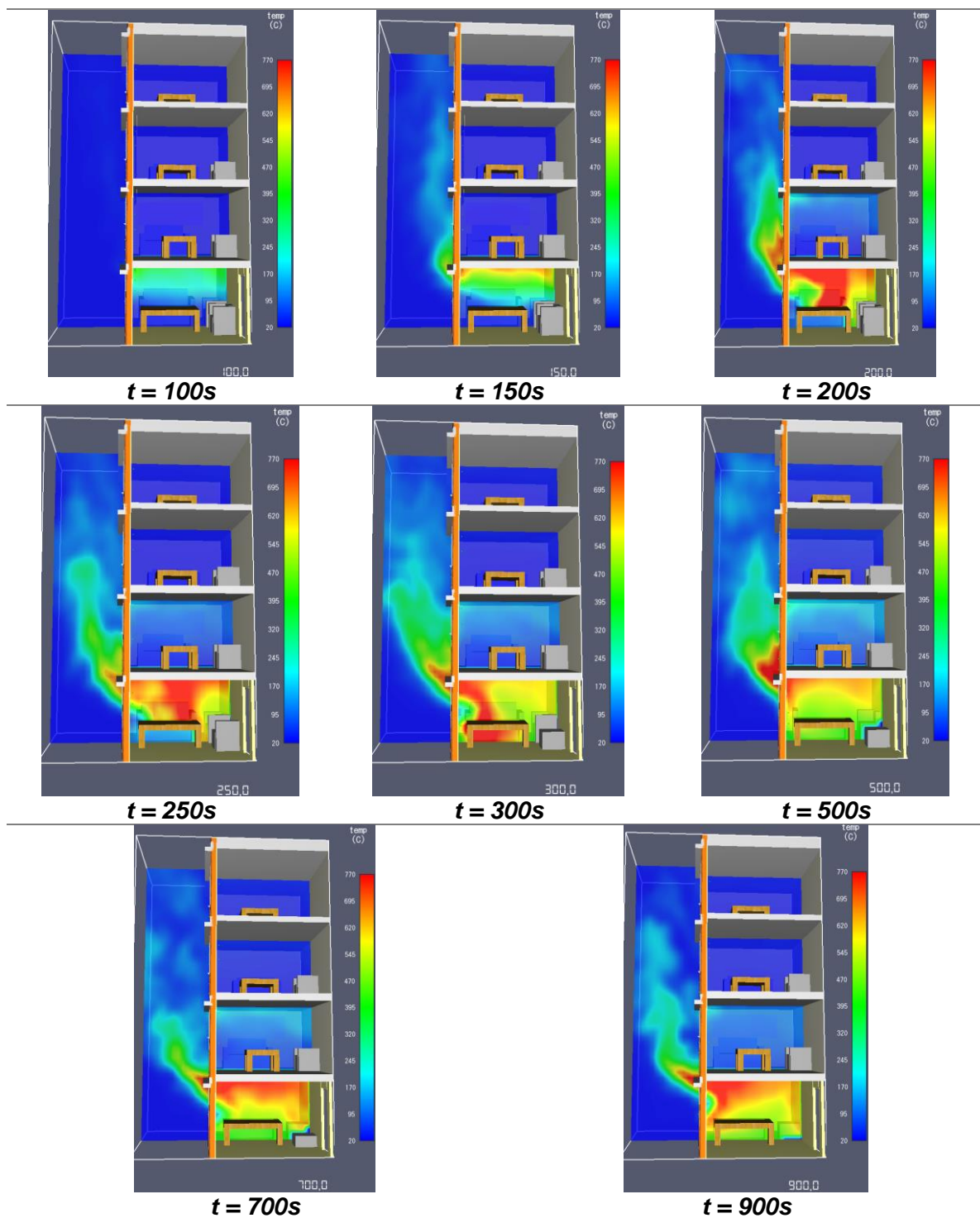
Els vidres del primer pis trenquen als 160 segons, mentre que la resta no ho arriben a fer.



**Taula 38. Simulació amb ràfec 20+20cm tocant la llinda**

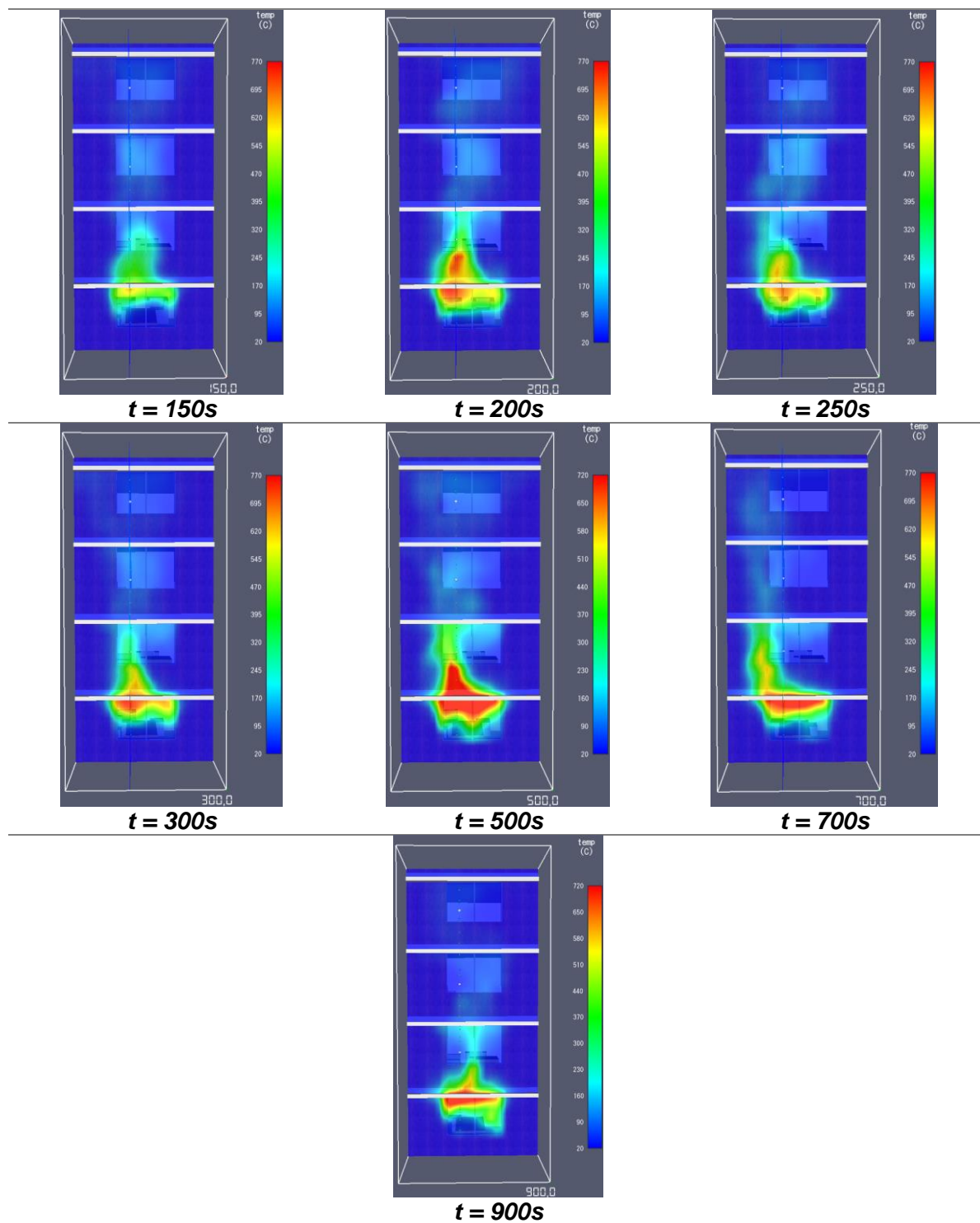


Com en els casos 2.6.7 i 2.6.8, l'efecte del *leap-frog* és evident i en temps molt similars. En la taula 39 es pot observar l'evolució de com les flames aconseguixen entrar dins el recinte del primer pis.



Taula 39. Simulació 20+20cm tocant la llinda amb projecció de temperatures en el pla perpendicular que passa pel mig de la finestra més propera a la font d'ignició

Situació similar és la que es repeteix per a les temperatures en la superfície de la façana, on les flames busquen l'esquerra de les finestres per seguir progressant en l'altura.

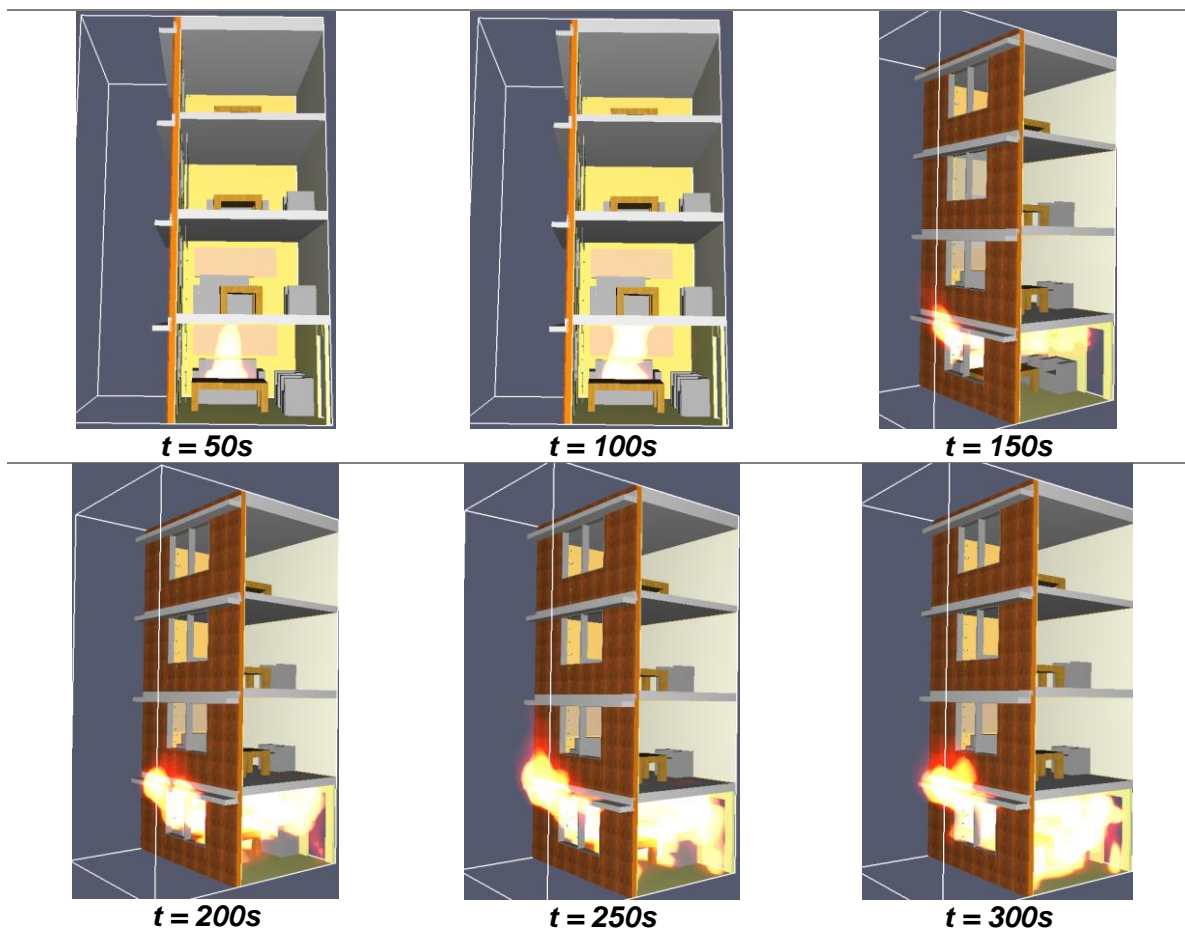


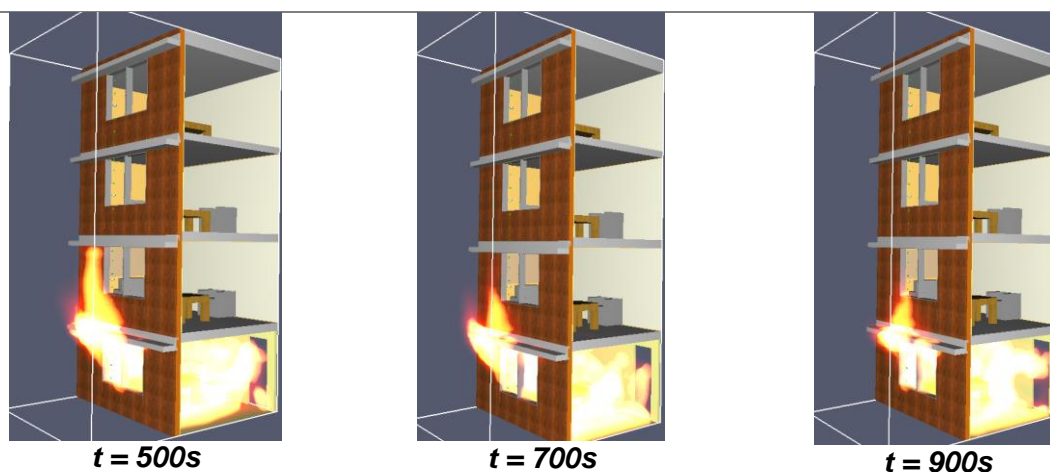
Taula 40. Temperatures en la simulació 20+20cm tocant la llinda sobre la superfície de la façana

### 2.6.12. Ràfec de 40+20 centímetres tocant la llinda

Afegint 20cm més d'amplada al ràfec, les flames triguen 200s a superar el primer ràfec però fins 100s més tard no aconsegueixen cremar la fusta del revestiment. Posteriorment les flames creixen ràpidament per la part esquerra de les finestra fins a assolir l'altura del segon ràfec. En el tram final de la simulació, les flames no aconsegueixen superar l'obstacle i entren en una fase d'oscil·lacions amb tendència a perdre l'altura màxima assolida.

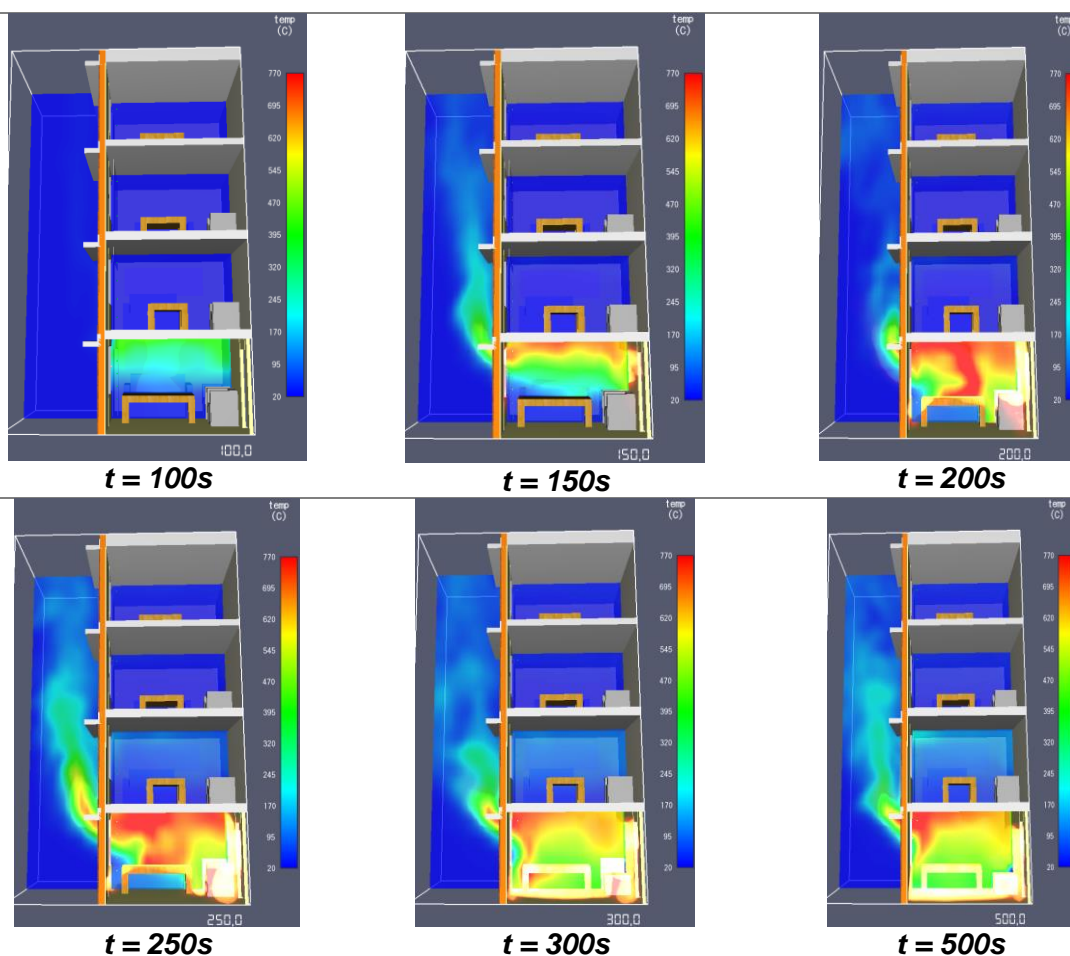
Els vidres del primer es trenquen als 210 segons, però els del segon i tercer no ho arriben a fer.



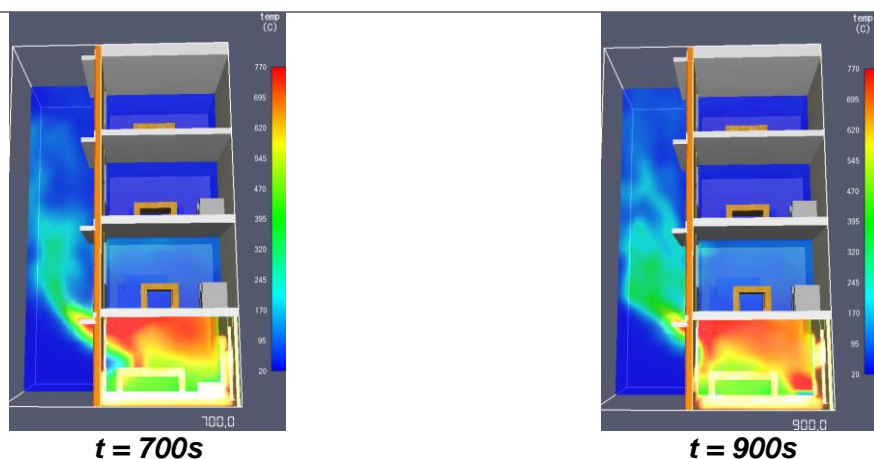


Taula 41. Simulació amb ràfec 40+20cm tocant la llinda

En la taula d'imatges 42 es pot observar com l'efecte del *leap-frog* és molt clar en els instants finals de la simulació, on les temperatures superiors del recinte assoleixen els 200°C. Probablement aquest sigui el perquè de que les flames no assoleixen cotes superiors: el segon ràfec impedeix que es propaguin cap amunt i aquestes es vegin forçades a entrar a l'interior del primer pis.

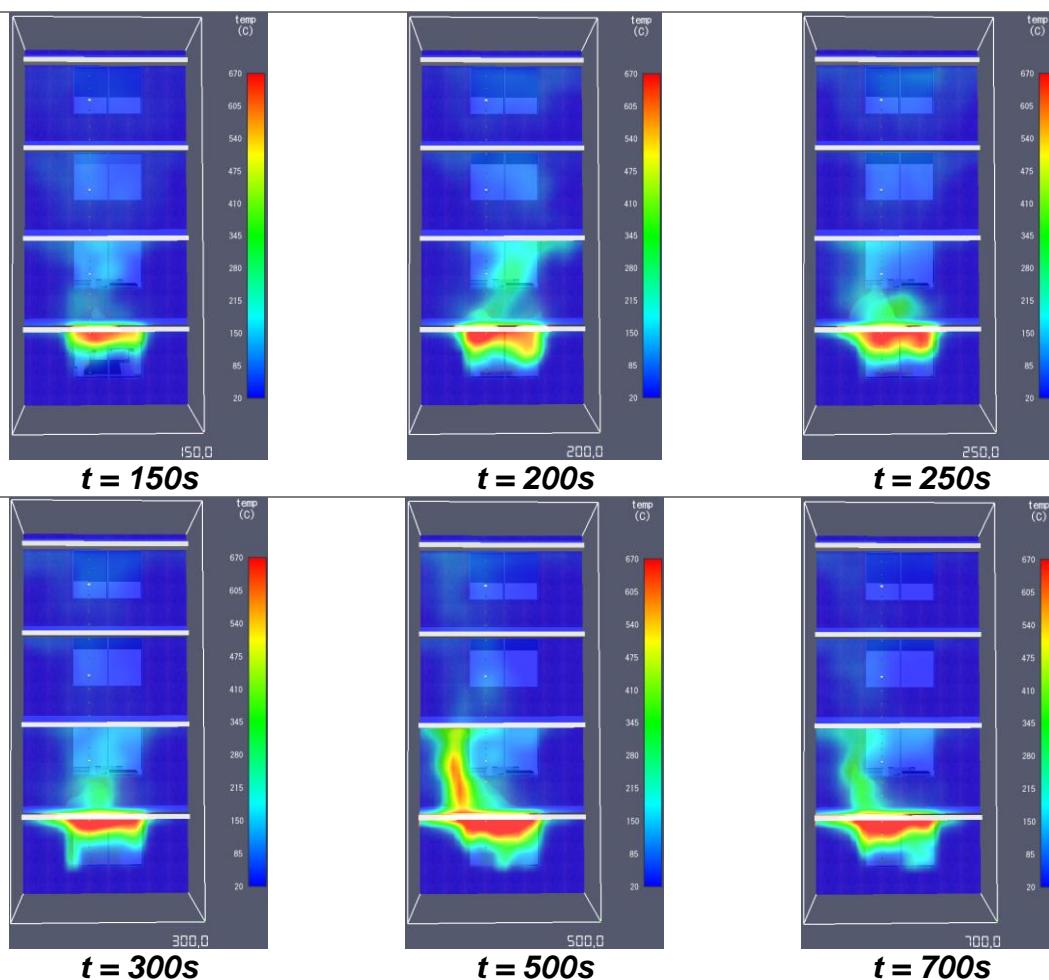


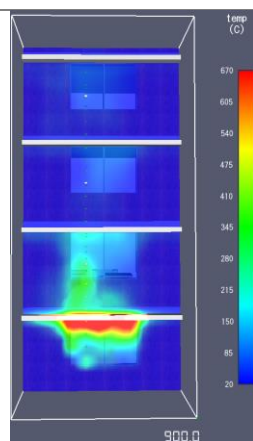




Taula 42. Simulació 40+20cm tocant la llinda amb projecció de temperatures en el pla perpendicular que passa pel mig de la finestra més propera a la font d'ignició

En la taula de figures 43, es pot observar molt clarament com les flames superen el primer ràfec amb certa rapidesa, però al cap de 200 segons, es desvien per centrar-se un altre cop amb les finestres i procedir al *leap-frog* davant la impossibilitat de seguir ascendint





**$t = 900s$**

Taula 43. Temperatures en la simulació 40+20cm tocant la llinda sobre la superfície de la façana

## 2.7. Comparativa del les simulacions dels ràfecs

Per realitzar un anàlisis comparatiu el més complert possible, s'avaluaran certs aspectes atesos a: la influència de la col·locació del ràfec, la profunditat del mateix i el moment en que les flames poden generar més risc a les persones que estiguin exposades a la propagació de l'incendi, és a dir, en el moment que es trenquen els vidres i, tant les flames com el fum, tenen via lliure per accedir a l'interior.

### 2.7.1. Trencament dels vidres

En la taula 44, es pot observar en quin moment es trenquen els vidres en funció del pis on estiguin ubicats. Cal recordar que aquests estan controlats per un detector de calor que s'activa quan la temperatura que enregistra és igual o superior als 300°C.

	P1	P2	P3
<b>20cm meitat</b>	180s	270s	-
<b>40cm meitat</b>	350s	-	-
<b>60cm meitat</b>	-	-	-
<b>80cm meitat</b>	-	-	-
<b>20+20cm meitat</b>	155s	-	-
<b>40+20cm meitat</b>	280s	-	-
<b>20cm tocant la llinda</b>	170s	520s	-
<b>40cm tocant la llinda</b>	290s	-	-
<b>60cm tocant la llinda</b>	-	-	-
<b>80cm tocant la llinda</b>	-	-	-
<b>20+20cm tocant la llinda</b>	160s	-	-
<b>40+20cm tocant la llinda</b>	210s	-	-

Taula 44. Resum dels moments en que els vidres es trenquen en les simulacions dels ràfecs

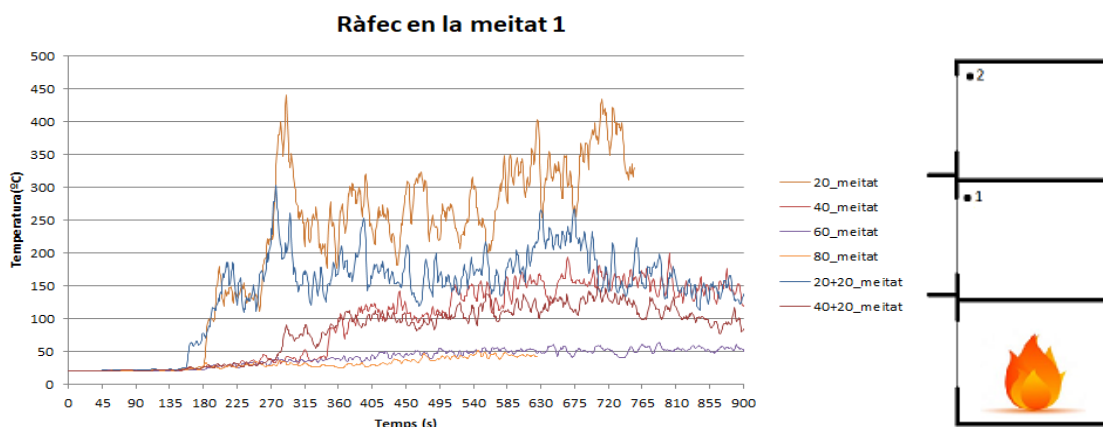
Si es compara amb la taula 45, es pot observar que la incorporació de ràfecs té un efecte positiu per obstaculitzar l'avançament del foc cap a cotes, sobretot si es tracta de l'amplada del ràfec, on s'observa que a partir de 60cm, les temperatures no són prou altes com per activar el detector.

	P1	P2	P3
No combustible	155	-	-
Fusta combustibilitat mitja	160	-	-
Fusta combustibilitat alta			
Fusta combustibilitat alta + porta al centre			

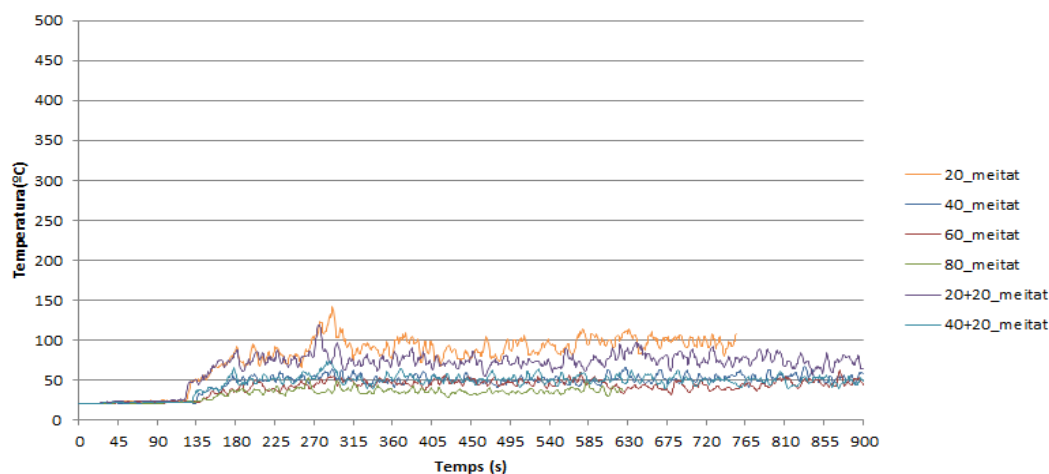
Taula 45. Resum dels moments en que es trenquen els vidres en les simulacions sense ràfecs

Comparant els temps del primer pis, s'observa que no hi ha diferències substancials entre tenir un ràfec de 20cm y no tenir-ne, probablement pel fet de que la càrrega de combustible que porta l'incendi és tant gran, que quan trenca els vidres de la planta baixa, la mateixa inèrcia tèrmica fa trencar els vidres del primer pis en pocs segons. Un cop el ràfec és més ample, s'arriba inclòs a frenar aquest avançament. Tampoc s'observa una millora en els temps quan s'incorpora la franja de material incombustible al ràfec de 40cm. De fet, tot el contrari: en el cas del ràfec al mig, empitjora 70s, i amb el ràfec tocant la llinda, empitjora en 80s.

Pel que fa a les temperatures interiors, s'han seleccionat els termoparells situats en la part superior del primer i segon, ja que els vidres del tercer no ho arriben a trencar mai. En les gràfiques 2 i 3, es poden observar les temperatures dels casos que tenen el ràfec en la meitat corresponents al primer i segon pis. En les gràfiques 4 i 5 les que tenen el ràfec tocant la llinda.

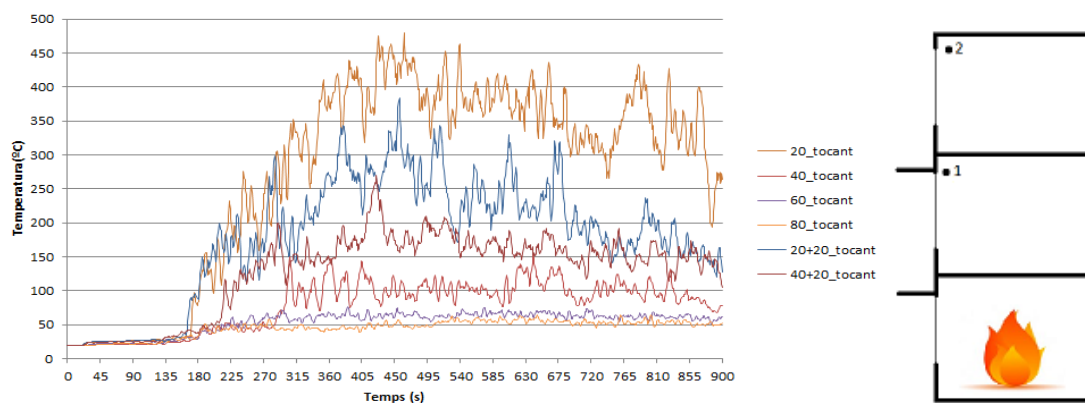


### Ràfec en la meitat 2



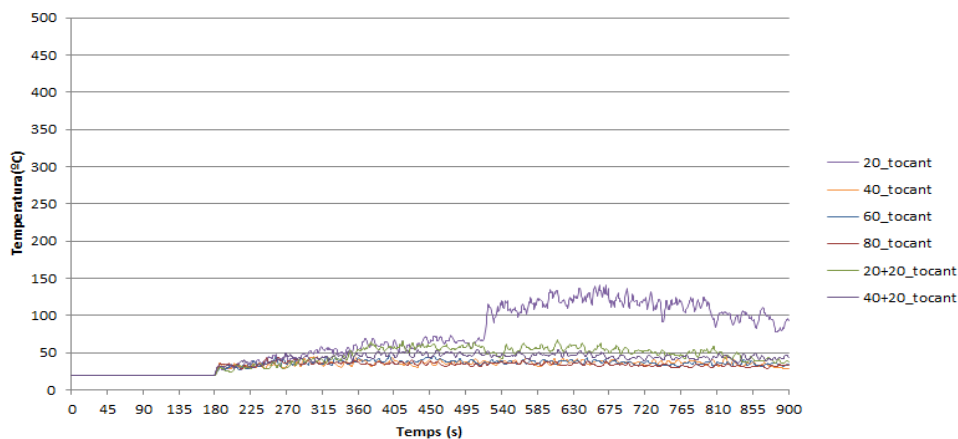
Gràfica 4 Evolució temperatures a l'interior per als diferents alers col·locats en la meitat per al termoparell 2

### Ràfec tocant la llinda 1



Gràfica 5 Evolució temperatures a l'interior per als diferents alers col·locats tocant la llinda per al termoparell 1

### Ràfec tocant la llinda 1



Gràfica 6 Evolució temperatures a l'interior per als diferents alers col·locats tocant la llinda per al termoparell 2

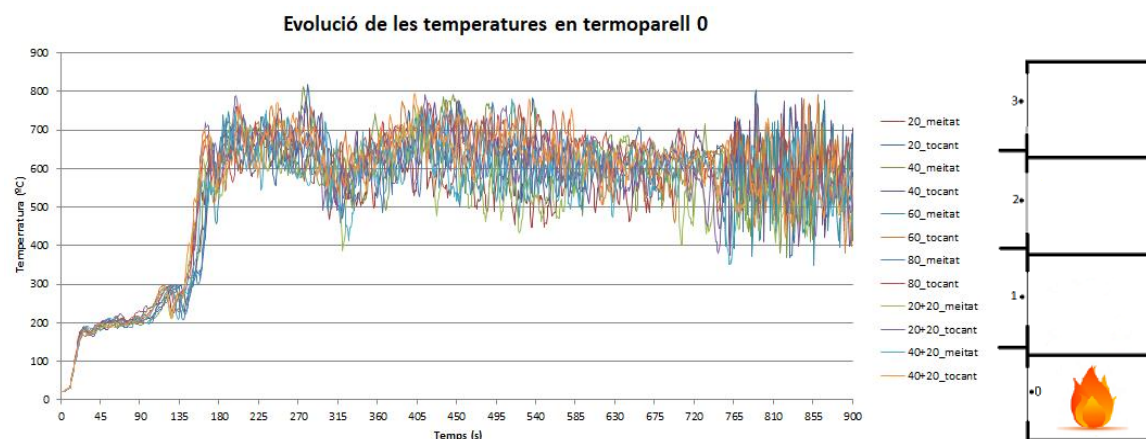


En el cas del termoparell del primer pis, es pot observar molt clarament el descens de temperatures conforme se li afegeix amplada al ràfec. També s'aprecien diferències clares entre els ràfecs que incorporen la franja de 20cm de material incombustible i les que no, com era previsible.

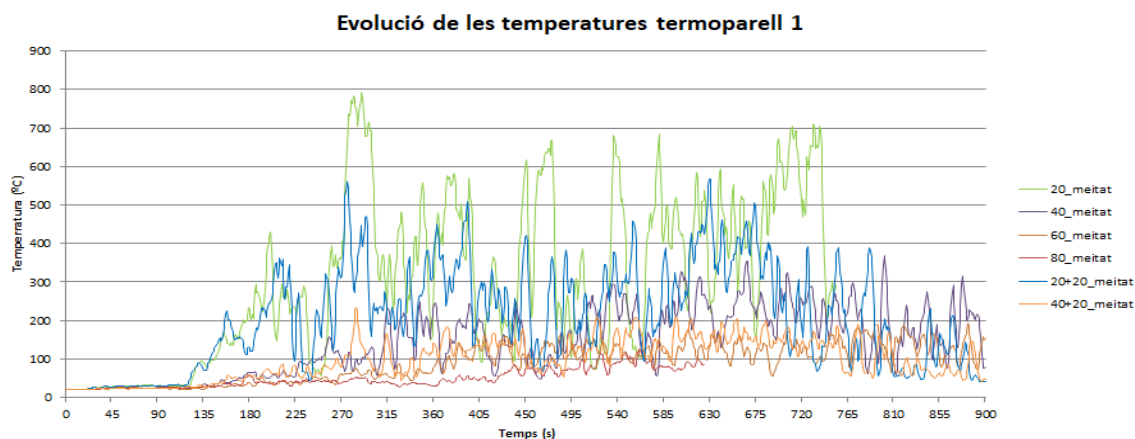
En el segon pis, les temperatures pateixen una davallada degut a que en les simulacions dels ràfecs de 40cm en amunt els vidres no es trenquen, per això les temperatures no assoleixen valors superiors als 50°C. En els casos de ràfecs de 20cm, l'únic cas que es podria destacar, és el que està tocant la llinda on es produeix un augment sobtat de la temperatura cap als 500 segons, moment el que es trenquen els vidres. En aquest moment tot l'aire calent que provenia del primer pis s'escola i escalfa ràpidament la part superior de l'interior del primer pis. En l'apartat 2.6.7 no es pot apreciar degut a l'escala, ja que l'augment és de 60-70°C i no arriba al valor mínim per representar un canvi de color. En el cas del ràfec de 20cm en la meitat, el trencament es produeix als 260s, observable també en la gràfica 3 de color taronja. A partir d'aquest punt, les temperatures enregistrades assoleixen el mateix rang de valors que en el cas de 20cm tocant la llinda.

### **2.7.2. Influència de l'amplada del ràfec**

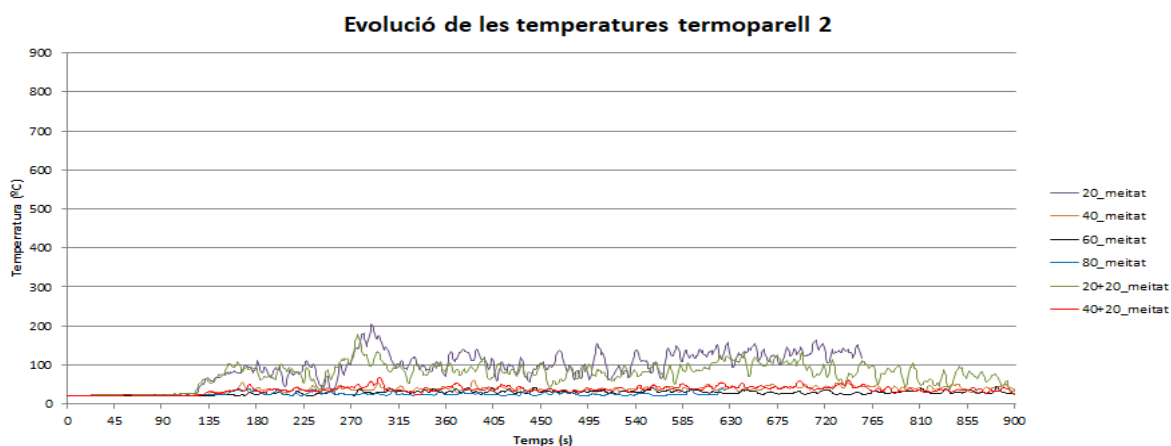
Per poder comparar la influència de l'amplada del ràfec s'han tractat per separat les dades que provenen del ràfec al mig i tocant la llinda. Els termoparells són els mateixos per a les 12 simulacions dels ràfecs: els detectors de calor que estan col·locats el més al centre possible de les finestres. Amb l'objectiu d'obtenir una millor imatge de l'evolució s'han dividit els casos segons la col·locació del ràfec. D'aquesta manera es poden visualitzar d'una manera més clara la progressió de les temperatures en funció de l'amplada de l'aler. Per donar una magnitud sobre el total, en la gràfica 6 es poden observar totes les temperatures enregistrades sota el primer ràfec. Aquí no es fa cap distinció perquè realment no aporten valor simbòlic, només una prova de repetibilitat a l'hora de simular les mateixes fases una vegada i una altra (l'escenari de la PB no canvia mai). En les gràfiques 7, 8 i 9 es poden observar les temperatures corresponents als models que tenen el ràfec en la meitat, i en les gràfiques 10, 11 i 12, les dels models amb el ràfec tocant la llinda.



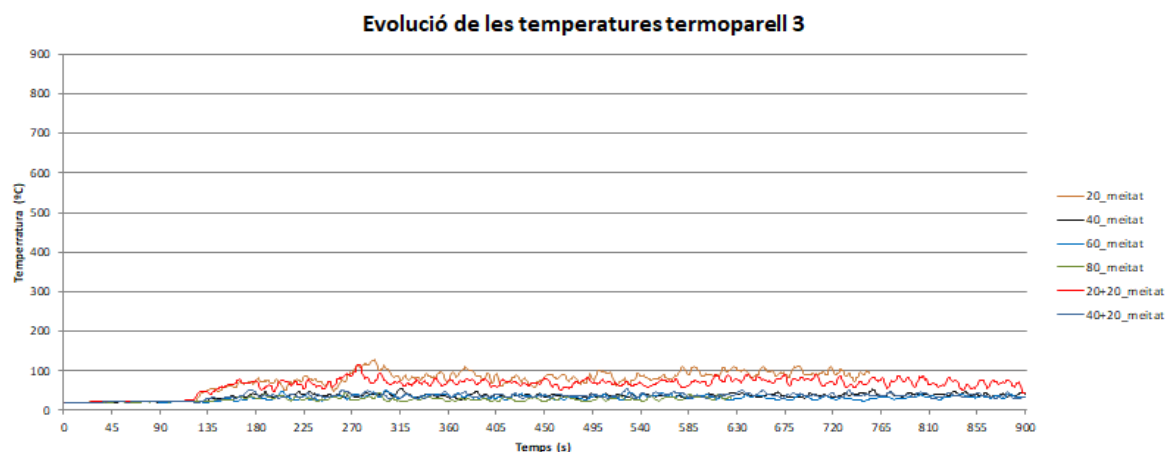
**Gràfica 7 Evolució temperatures per al termoparell 0 per a tots els casos**



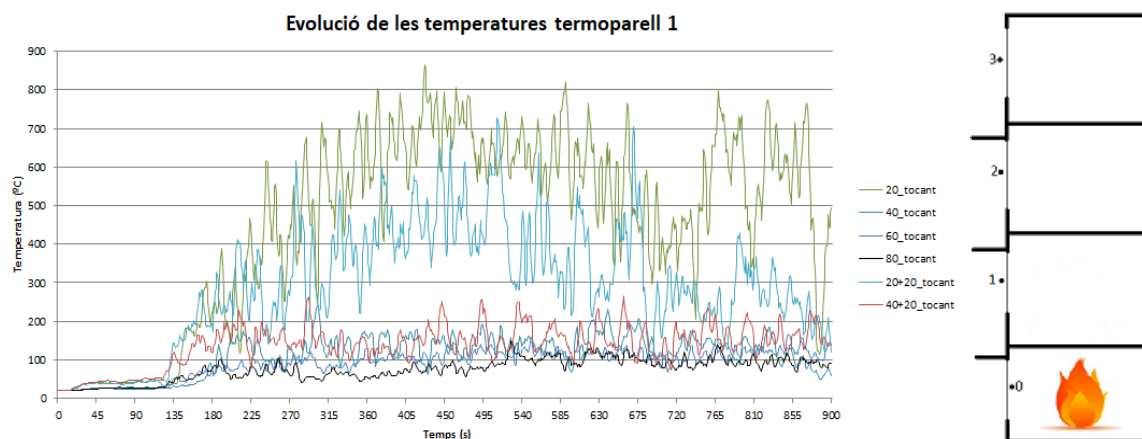
**Gràfica 8 Evolució temperatures per al termoparell 1 per al ràfec en la meitat**



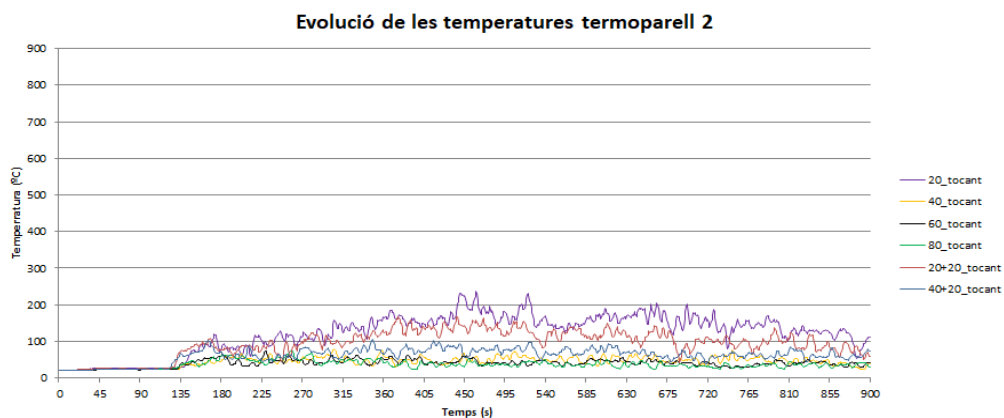
**Gràfica 9 Evolució temperatures per al termoparell 2 per al ràfec en la meitat**



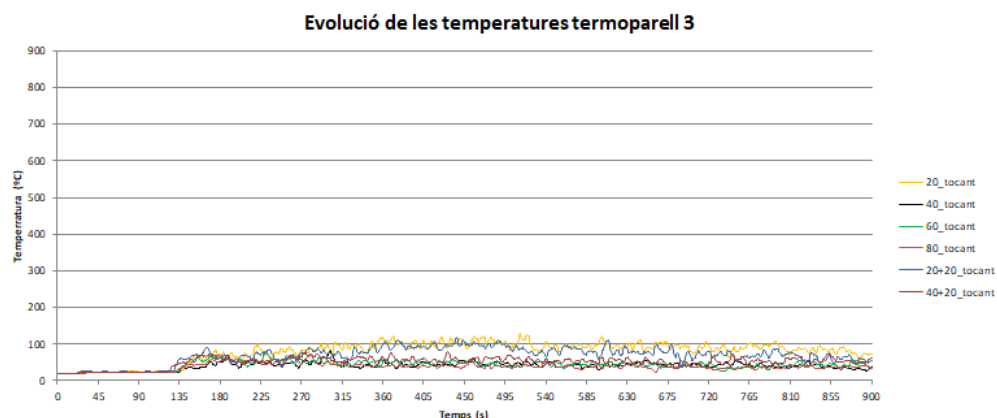
**Gràfica 10 Evolució temperatures per al termoparell 3 per al ràfec en la meitat**



**Gràfica 11 Evolució temperatures per al termoparell 1 per al ràfec tocant la llinda**



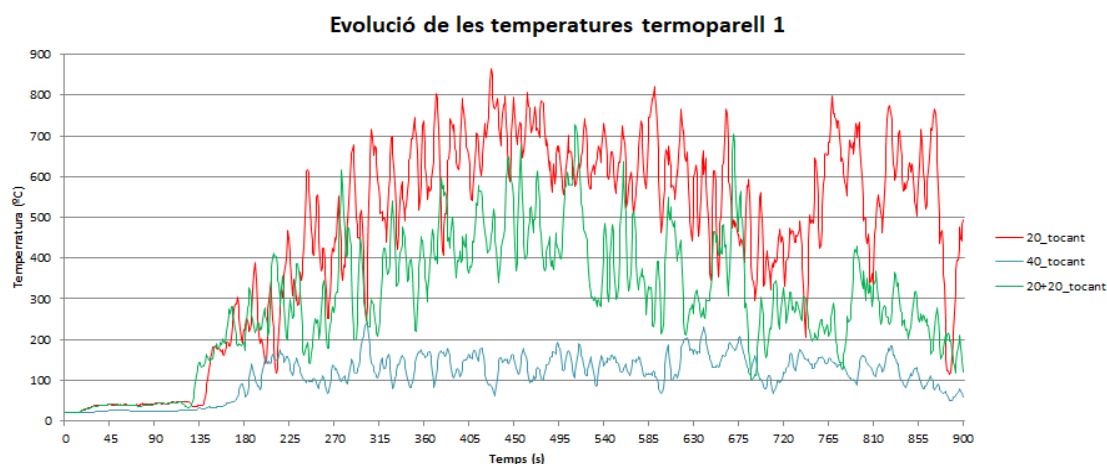
**Gràfica 12 Evolució temperatures per al termoparell 2 per al ràfec tocant la llinda**



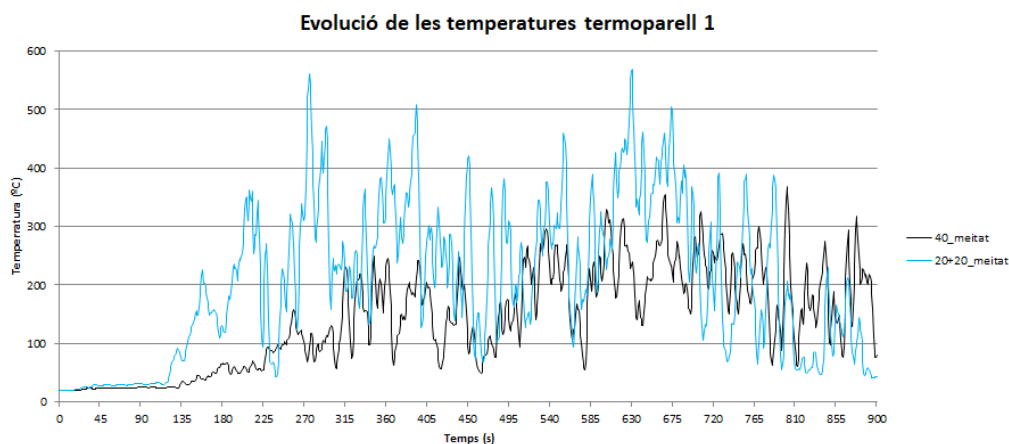
**Gràfica 13 Evolució temperatures per al termoparell 3 per al ràfec tocant la llinda**

En els casos més clars on es pot veure l'efecte de l'amplada del ràfec és en les gràfiques 7 i 10, corresponents al termoparell situat al primer pis. En aquestes es pot observar les grans oscil·lacions que s'enregistren degut als moviments de les flames i el comportament un tant aleatori que tenen. Tot i això, la reducció de temperatures és molt més gran quan es passen de 20cm d'amplada a 40cm. Amb més amplada de 40cm s'aconsegueix una reducció menor ja que com s'ha vist en les descripcions de les simulacions, a partir de 60cm les flames amb prou feines podien superar l'obstacle del primer ràfec. En el termoparell 2 encara es poden observar aquestes diferències però la reducció de temperatures degut a l'alçada i l'efecte del segon ràfec fa que les temperatures es redueixin 500-600°C en els casos de ràfecs de 20cm i 150-200°C per als de 40cm. La resta de casos la diferència és inapreciable. Finalment, per al termoparell 3 corresponent a l'últim pis, les diferències són encara menors i les temperatures que s'assoleixen són probablement a les temperatures dels fums calents exclusivament.

Per altra banda, el fet de tenir una franja de la mateixa distància en vertical no provoca el mateix efecte que tenir-la en horitzontal. En la gràfica 13, corresponents a les simulacions de 20cm, 40cm i 20+20cm tocant la llinda del termoparell 1, es pot observar que la reducció de temperatures és major en el cas d'afegir la mateixa distància de material incombustible en horitzontal que en vertical. El mateix succeeix per als casos on el ràfec es troba en la meitat, tot i que menys clar degut al soroll generat per les grans fluctuacions de les temperatures (gràfica 14). S'ha exclòs la de 20cm sense franja perquè no deixava veure aquestes diferències correctament en el gràfic.



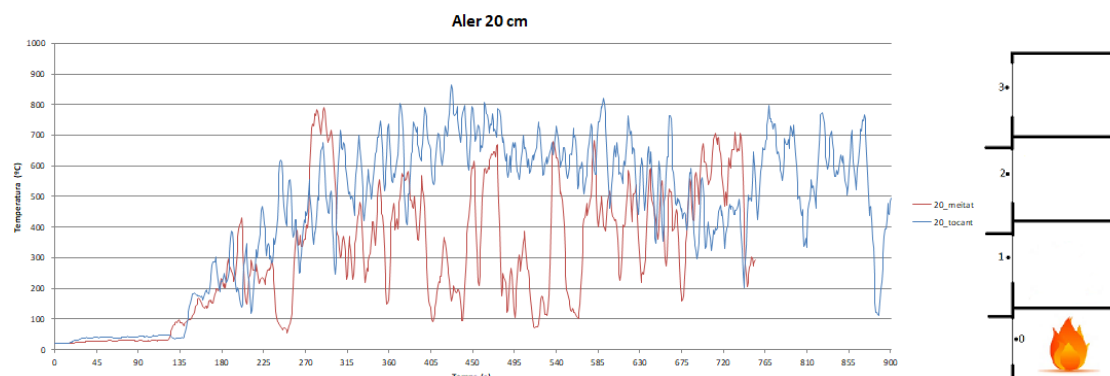
**Gràfica 14 Evolució de les temperatures per al termoparell 1 corresponents als casos 20, 40 i 20+20cm tocant la llinda**



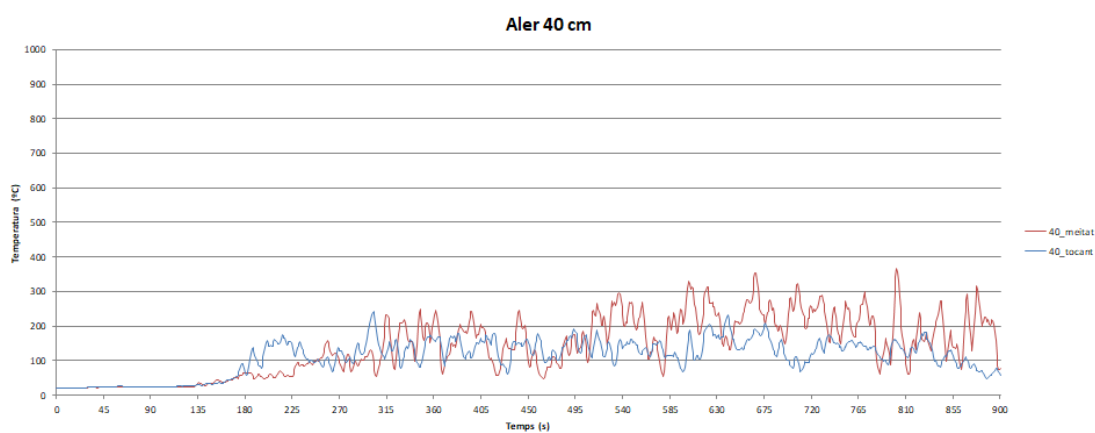
**Gràfica 15 Evolució de les temperatures per al termoparell 1 corresponents als casos 40 i 20+20cm en la meitat**

### 2.7.3. Influència de la col·locació del ràfec

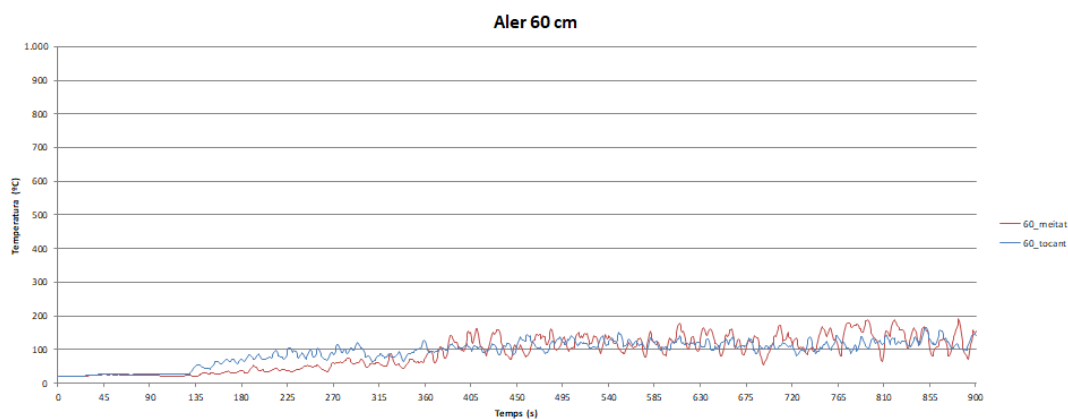
La col·locació del ràfec també ha estat un dels factors considerats que podia influir en la propagació de l'incendi, així que s'han realitzat les gràfiques comparatives corresponents al mateix termoparell de l'apartat 2.7.2, però en aquest cas fixant l'amplada del ràfec. En les gràfiques 15-20 es poden observar els resultats obtinguts.



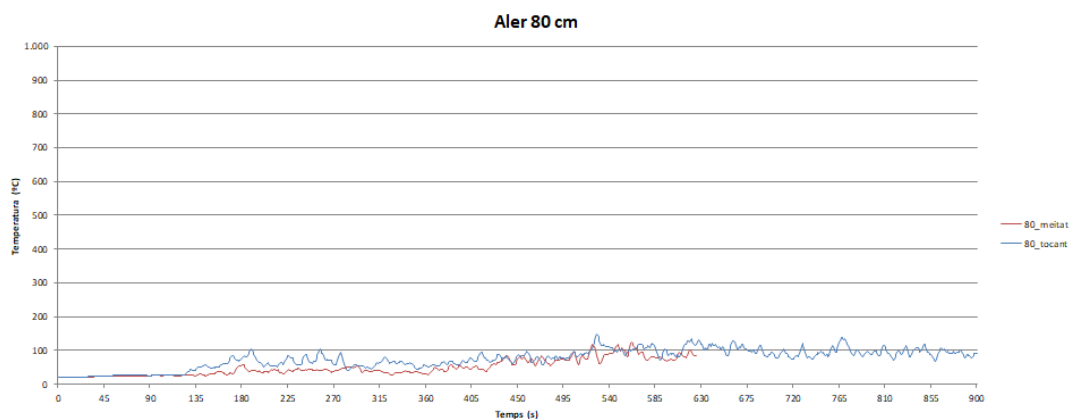
**Gràfica 16 Evolució de les temperatures per al termoparell 1 corresponents al ràfec de 20cm**



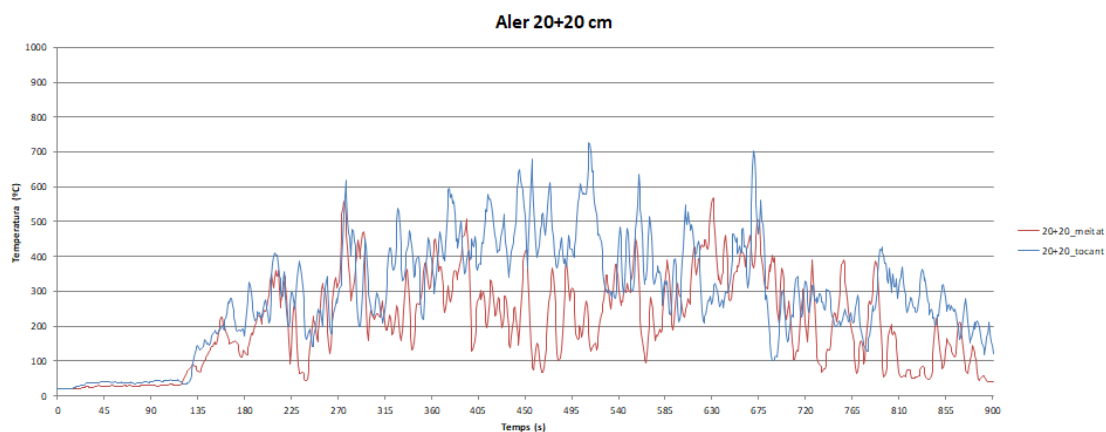
**Gràfica 17 Evolució de les temperatures per al termoparell 1 corresponents al ràfec de 40cm**



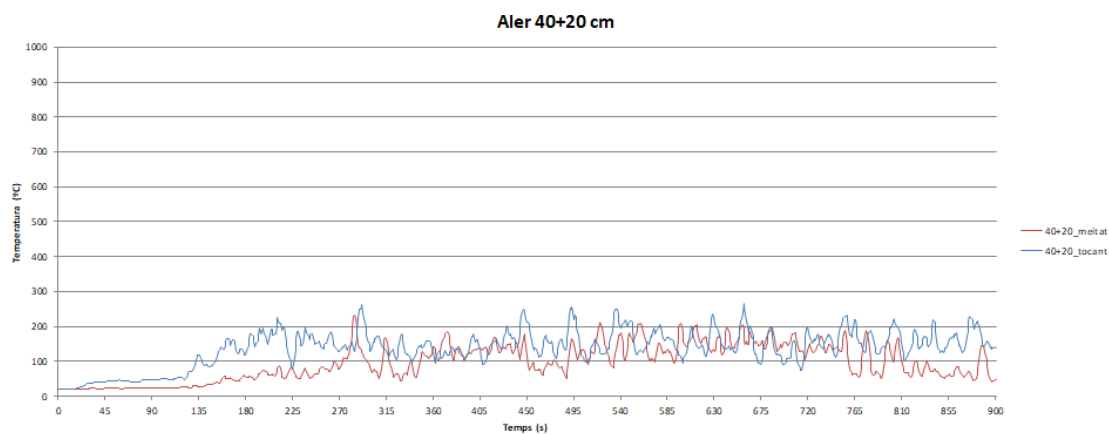
**Gràfica 18 Evolució de les temperatures per al termoparell 1 corresponents al ràfec de 60cm**



**Gràfica 19** Evolució de les temperatures per al termoparell 1 corresponents al ràfec de 80cm



**Gràfica 20** Evolució de les temperatures per al termoparell 1 corresponents al ràfec de 20+20cm



**Gràfica 21** Evolució de les temperatures per al termoparell 1 corresponents al ràfec de 40+20cm

Pel que fa a les temperatures màximes assolides no s'observen grans diferències, a excepció de les simulacions amb les amplades de ràfecs de 20cm (gràfiques 15 i 19). En elles es pot observar com en el tram central de la simulació amb el ràfec en la meitat (entre els 350s i els 650s aprox.), les temperatures pateixen una davallada i després recuperen els valors inicials del *post-flashover*.

El que sí que es pot determinar en les altres simulacions, és que el temps que triguen les flames en assolir les temperatures màximes és més alt en els casos on el ràfec es troba en la meitat, retardant l'efecte del *leap-frog*. Aquest fet també es pot observar en la taula 44, on els temps que triguen les flames en trencar els vidres són més grans.

### 3. CONCLUSIONS GENERALS Y PROSPECTIVES

La necessitat d'un entorn sostenible, l'ús eficient dels recursos i el desenvolupament de noves tècniques constructives ha orientat el foment de recursos de base renovable. La fusta, al tractar-se un dels materials principals que en aquest sector creixent, ha sigut objecte d'estudi en els últims 50-60 anys degut el seu comportament davant el foc. Així ho demostren els nombrosos estudis realitzats des de la dècada dels 80 fins a l'actualitat.

Per tal d'estudiar experimentalment el fenomen de la propagació, s'han realitzat nombrosos assajos en la vida real, però aquests han acabat resultant costos i molt influenciables per condicions incontrolables per a l'ésser humà. És per això que s'ha desenvolupat la via de la simulació informàtica mitjançant la simulació computacional de fluids per obtenir resultats orientatius rellevants. Aquestes dades no certifiquen que succeiria exactament el mateix en la vida real, però que sí dona una visió aproximada cada cop millor respecte al comportament de les flames.

Pel que fa a l'experimentació amb el programa FDS s'han simulat quatre escenaris simples que només es distingien per el tipus de material del quals estava feta la façana. Posteriorment, amb el material més combustible s'ha intentat buscar la incorporació d'elements passius en la façana tals com ràfecs i franges de material incombustible per tal de retardar i en alguns casos frenar per complert, la propagació de l'incendi a través de la façana. En aquesta segona part s'han realitzat fins a dotze simulacions més, de les quals s'han extret dades importants que podrien ajudar a completar la norma actual en el disseny de façanes simples amb revestiment combustible.



S'ha comprovat que els ràfecs ofereixen una millor resistència a la propagació al foc que zones de materials incombustibles col·locats de manera vertical, fet que no ho contempla el codi tècnic.

Pel que fa a la investigació sobre la col·locació dels ràfecs, s'ha vist que la tendència és més positiva, pel que fa al retardament de la propagació de les flames, si el ràfec es troba en una zona intermèdia entre els pisos, i no més a prop de la llinda del pis inferior (on també s'ha observat que afavoreix l'entrada de les flames als recintes superiors).

Pel que fa a futures línies d'investigació, l'objectiu seria seguir progressant en el disseny dels programaris que permeten la simulació d'incendis i, a l'hora, simular el màxim nombre d'escenaris possibles. Pel que fa als escenaris, el més interessant seria simular el màxim tipus de models de façana fetes de materials combustibles per tal d'extraure dades que ajudin a la realització d'una norma completa i segura.

## 4. BIBLIOGRAFIA

- ANDERSON, J., BOSTRÖM, L., ... R.M.-M. web of y 2016, undefined, 2016. Uncertainties in façade fire tests—measurements and modeling. *matec-conferences.org* [en línea], pp. 13. [Consulta: 15 septiembre 2019]. Disponible en: [https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/abs/2016/09/mateconf\\_03002/mateconf\\_03002.html](https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/abs/2016/09/mateconf_03002/mateconf_03002.html).
- ASIMAKOPOULOU, E.K., KOLAITIS, D.I. y FOUNTI, M.A., 2017. Thermal characteristics of externally venting flames and their effect on the exposed façade surface. *Fire Safety Journal*, vol. 91, pp. 451-460. ISSN 03797112. DOI 10.1016/j.firesaf.2017.03.075.
- CHOW, W., 2013. Experience on Implementing Performance-based Design in Hong Kong. *Procedia Engineering*, vol. 62, pp. 28-35. ISSN 18777058. DOI 10.1016/j.proeng.2013.08.041.
- COLWELL, S., FOSTER, J. y MARTIN, B., 2000. Fire performance of external cladding systems. *Fire Safety Engineering* [en línea], vol. 7, no. 2, pp. 19-23. [Consulta: 15 septiembre 2019]. Disponible en: <https://www.worldcat.org/title/fire-performance-of-external-cladding-systems/oclc/194918289>.
- COLWELL, S.A., SMITH, D.J., FIRE RESEARCH STATION. y CONSTRUCTION RESEARCH COMMUNICATIONS., 1999. *Assessing the fire performance of external cladding systems : a test method* [en línea]. London: Construction Research Communications Ltd. by permission of Building Research Establishment Ltd. [Consulta: 15 septiembre 2019]. ISBN 9781860812903. Disponible en: <http://www.ihsti.com/CIS/document/250069>.
- CSCAE, 2016. *SEGURIDAD EN CASO DE INCENDIO - CÓDIGO TÉCNICO DE EDIFICACIÓN* [en línea]. 2016. S.l.: s.n. [Consulta: 20 mayo 2019]. Disponible en: [http://www.coavn.org/coavn/cte/presentacion/CTE\\_DB\\_SI6\\_Total\\_Zulueta.pdf](http://www.coavn.org/coavn/cte/presentacion/CTE_DB_SI6_Total_Zulueta.pdf).
- FIRESTATION, 2019. Euroclases de reacción al fuego y de resistencia al fuego para los productos de construcción y los elementos constructivos « FireStation. [en línea]. [Consulta: 15 septiembre 2019]. Disponible en: <https://firestation.wordpress.com/2011/10/31/euroclases-de-reaccion-al-fuego-y-de-resistencia-al-fuego-para-los-productos-de-construccion-y-los-elementos-constructivos-2/>.
- GALEA, E., 1989. On the Field Modelling Approach to the Simulation of Enclosure Fires. *Journal of Fire Protection Engineering* [en línea], vol. 1, no. 1, pp. 11-22. [Consulta: 3 agosto 2019]. DOI 10.1177/104239158900100103. Disponible en: <http://jfe.sagepub.com/cgi/doi/10.1177/104239158900100103>.
- GIRALDO FORERO, M. del P., 2012. Evaluación del comportamiento del fuego y protección contra incendios en diversas tipologías de fachadas. *TDX (Tesis Doctorals en Xarxa)* [en línea], [Consulta: 15 septiembre 2019]. Disponible en: <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/94839#.XX6pkrJ6JJM.mendeley>.
- GUILLAUME, E., FATEH, T., SCHILLINGER, R., CHIVA, R. y UKLEJA, S., 2018. Study of fire behaviour of facade mock-ups equipped with aluminium composite material-based claddings, using intermediate-scale test method. *Fire and Materials* [en línea], vol. 42, no. 5, pp. 561-577.

- [Consulta: 15 septiembre 2019]. DOI 10.1002/fam.2635. Disponible en: <http://doi.wiley.com/10.1002/fam.2635>.
- HAKKARAINEN, T. y OKSANEN, T., 2002. Fire safety assessment of wooden facades. *Fire and Materials* [en línea], vol. 26, no. 1, pp. 7-27. [Consulta: 15 septiembre 2019]. DOI 10.1002/fam.780. Disponible en: <http://doi.wiley.com/10.1002/fam.780>.
- HARRIS, M., 2011. Cladding panels: Insulated panel systems & passive fire protection. *International Fire Protection Magazine* [en línea], no. 47, pp. 80-82. [Consulta: 15 septiembre 2019]. Disponible en: <http://ifpmag.mdmpublishing.com/ifp-magazine-issue-47-august-2011/>.
- INSTITUTION, B. standards, 2015. *Fire performance of external cladding systems. Test method for non-loadbearing external cladding systems applied to the masonry face of a building (incorporating corrigendum No. 1)* [en línea]. London: British Standards Institute. [Consulta: 15 septiembre 2019]. ISBN 9780580916908. Disponible en: <https://www.ihsti.com/CIS/document/312763?PreviousPage=browse%252fpublishers%252fbritish-standards-institution>.
- ISOVER SAINT-GOBAIN, 2019. Detalles Constructivos según CTE - Fachadas. [en línea]. [Consulta: 21 junio 2019]. Disponible en: <https://www.isover.es/documentacion/detalles-constructivos-segun-cte/detalles-constructivos-segun-cte-fachadas>.
- KLOPOVIC, S. y TURAN, Ö.F., 1998. Flames venting externally during full-scale flashover fires: two sample ventilation cases. *Fire Safety Journal*, vol. 31, no. 2, pp. 117-142. ISSN 03797112. DOI 10.1016/S0379-7112(97)00065-9.
- LIGNUM FACILE, 2018. *MADERA Y FUEGO: Los productos de la construcción de madera y su comportamiento al fuego* [en línea]. 2018. S.l.: Cluster de la Madera de Galicia. [Consulta: 25 julio 2019]. Disponible en: <http://www.contrafort.cat/bioconstruccio/Rf-0.pdf>.
- MADERAME, 2019. Fachadas de Madera: Características, Tipos y Ejemplos | Maderame. [en línea]. [Consulta: 14 agosto 2019]. Disponible en: <https://maderame.com/fachadas-madera/>.
- MOGHTADERI, B. y FLETCHER, D.F., 1988. Flaming Combustion Characteristics Of Wood-Based Materials. *Fire Safety Science* [en línea], vol. 3, pp. 209-220. [Consulta: 15 septiembre 2019]. Disponible en: <https://www.iafss.org/publications/aofst/3/209>.
- NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION., [sin fecha]. *Fire technology*. S.l.: Kluwer Academic Publishers.
- NISHIO, Y., YOSHIOKA, H., ... T.N.-M.W. of y 2013, undefined, [sin fecha]. Experimental study on fire propagation over combustible exterior facades in Japan. *matec-conferences.org* [en línea], [Consulta: 15 septiembre 2019]. Disponible en: [https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/abs/2013/07/mateconf\\_isfsf13\\_04001/mateconf\\_isfsf13\\_04001.html](https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/abs/2013/07/mateconf_isfsf13_04001/mateconf_isfsf13_04001.html).
- NISHIO, Y., YOSHIOKA, H., NOGUCHI, T., KANEMATSU, M., ANDO, T., HASE, Y. y HAYAKAWA, T., 2016. Fire Spread Caused by Combustible Facades in Japan. *Fire Technology* [en línea], vol. 52, no. 4, pp. 1081-1106. [Consulta: 15 julio 2019]. DOI 10.1007/s10694-015-0535-5.

Disponible en: <http://link.springer.com/10.1007/s10694-015-0535-5>.

NORMALIZACIÓN ESPAÑOLA, 2018. Norma UNE-EN 438-9:2018. [en línea]. [Consulta: 15 septiembre 2019]. Disponible en: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0059826>.

OLESZKIEWICZ, I., 1990. Fire exposure to exterior walls and flame spread on combustible cladding. *Fire Technology* [en línea], vol. 26, no. 4, pp. 357-375. [Consulta: 15 septiembre 2019]. ISSN 0015-2684. DOI 10.1007/BF01293079. Disponible en: <http://link.springer.com/10.1007/BF01293079>.

PENG, L., NI, Z. y HUANG, X., 2013. Review on the Fire Safety of Exterior Wall Claddings in High-rise Buildings in China. *Procedia Engineering* [en línea], vol. 62, pp. 663-670. [Consulta: 15 septiembre 2019]. ISSN 1877-7058. DOI 10.1016/J.PROENG.2013.08.112. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705813012940>.

SEO, D., KIM, D., KIM, B. y KWON, Y., 2013. An Experimental Study on the Combustibles Investigation and Fire Growth Rate for Predicting Initial Fire Behavior in Building. *Procedia Engineering*, vol. 62, pp. 671-679. ISSN 18777058. DOI 10.1016/j.proeng.2013.08.113.

SMOLKA, M., MESSERSCHMIDT, B., SCOTT, J. y MADEC, B. le, 2013. Semi-natural test methods to evaluate fire safety of wall claddings. En: S. VALLERENT y C. FLORENCE (eds.), *MATEC Web of Conferences* [en línea], vol. 9, pp. 02012. [Consulta: 15 septiembre 2019]. ISSN 2261-236X. DOI 10.1051/mateconf/20130902012. Disponible en: <http://www.matec-conferences.org/10.1051/mateconf/20130902012>.

SP TECHNICAL RESEARCH INSTITUTE OF SWEDEN, [sin fecha]. External wall assemblies and facade claddings Reaction to fire. [en línea], vol. 1994, no. 5, pp. 16. [Consulta: 15 septiembre 2019]. Disponible en: [https://www.sp.se/sv/units/risesafe/safety/fire/Documents/Konstruktion/SP\\_FIRE\\_105\\_Fasader.pdf](https://www.sp.se/sv/units/risesafe/safety/fire/Documents/Konstruktion/SP_FIRE_105_Fasader.pdf).

WANG, Y., WU, Y., WANG, Q., LIEW, K.M., CHEN, H., SUN, J. y HE, L., 2014. Numerical study on fire response of glass facades in different installation forms. *Construction and Building Materials* [en línea], vol. 61, pp. 172-180. [Consulta: 15 septiembre 2019]. ISSN 0950-0618. DOI 10.1016/J.CONBUILDMAT.2014.03.012. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061814002591>.

WHITE, N., DELICHATSIOS, M., AHRENS, M. y KIMBALL, A., 2013. Fire hazards of exterior wall assemblies containing combustible components. En: S. VALLERENT y C. FLORENCE (eds.), *MATEC Web of Conferences* [en línea], vol. 9, pp. 02005. [Consulta: 15 septiembre 2019]. ISSN 2261-236X. DOI 10.1051/mateconf/20130902005. Disponible en: <http://www.matec-conferences.org/10.1051/mateconf/20130902005>.

YOSHIOKA, H., NISHIO, Y., TAMURA, M., YOSHIDA, M., NOGUCHI, T., OHMIYA, Y., KANEMATSU, M., ANDO, T., KOURA, K., TOMATSU, T. y OZAKI, Y., 2014. Façade Tests on Fire Propagation along Combustible Exterior Wall Systems. *Fire Science and Technology* [en línea], vol. 33, no. 1, pp. 1-15. [Consulta: 15 septiembre 2019]. DOI 10.3210/fst.33.1. Disponible en: <http://jlc.jst.go.jp/DN/JST.JSTAGE/fst/33.1?lang=en&from=CrossRef&type=abstract>.

## 5. ÍNDEX DE GRÀFICS

### 5.1. Índex de Taules

Taula 1. Fases de l'incendi segons la hipòtesis inicial .....	37
Taula 2. Energies de combustió considerades per al revestiment combustible .....	38
Taula 3. Simulació façana no combustible .....	40
Taula 4. Simulació façana simple fusta fusta baixa combustibilitat .....	41
Taula 5. Simulació façana simple de fusta d'alta combustibilitat.....	43
Taula 6. Simulació façana de fusta d'alta combustibilitat amb la porta al mig .....	44
Taula 7 Matriu de simulacions per als ràfecs.....	46
Taula 8. Simulació amb ràfec 20 cm a la meitat .....	49
Taula 9. Simulació 20cm a la meitat amb projecció de temperatures en el pla perpendicular que passa pel mig de la finestra més propera a la font d'ignició.....	50
Taula 10. Temperatures en la simulació 20cm a la meitat sobre la superfície de la façana .....	51
Taula 11. Simulació amb ràfec 40cm a la meitat .....	52
Taula 12. Simulació 40cm a la meitat amb projecció de temperatures en el pla perpendicular que passa pel mig de la finestra més propera a la font d'ignició.....	54
Taula 13. Temperatures en la simulació 40cm a la meitat sobre la superfície de la façana .....	55
Taula 14. Simulació amb ràfec 60cm a la meitat .....	56
Taula 15. Simulació 60cm a la meitat amb projecció de temperatures en el pla perpendicular que passa pel mig de la finestra més propera a la font d'ignició.....	57
Taula 16. Temperatures en la simulació 60cm a la meitat sobre la superfície de la façana .....	58

Taula 17. Simulació amb ràfec 80cm a la meitat .....	59
Taula 18. Simulació 80cm a la meitat amb projecció de temperatures en el pla perpendicular que passa pel mig de la finestra més propera a la font d'ignició .....	61
Taula 19. Temperatures en la simulació 80cm a la meitat sobre la superfície de la façana .....	61
Taula 20. Simulació amb ràfec 20cm a la meitat més la franja de 20cm de material incombustible .....	63
Taula 21. Simulació 20+20cm a la meitat amb projecció de temperatures en el pla perpendicular que passa pel mig de la finestra més propera a la font d'ignició .....	65
Taula 22. Temperatures en la simulació 20+20cm a la meitat sobre la superfície de la façana .....	66
Taula 23. Simulació amb ràfec 40cm a la meitat més la franja de 20cm de material incombustible .....	67
Taula 24. Simulació 40+20cm a la meitat amb projecció de temperatures en el pla perpendicular que passa pel mig de la finestra més propera a la font d'ignició .....	68
Taula 25. Temperatures en la simulació 40+20cm a la meitat sobre la superfície de la façana .....	69
Taula 26. Simulació amb ràfec 20cm tocant la llinda .....	71
Taula 27. Simulació 20cm tocant la llinda amb projecció de temperatures en el pla perpendicular que passa pel mig de la finestra més propera a la font d'ignició .....	72
Taula 28. Temperatures en la simulació 20cm tocant la llinda sobre la superfície de la façana .....	73
Taula 29. Simulació amb ràfec 40cm tocant la llinda .....	75
Taula 30. Simulació 40cm tocant la llinda amb projecció de temperatures en el pla perpendicular que passa pel mig de la finestra més propera a la font d'ignició .....	76
Taula 31. Temperatures en la simulació 40cm tocant la llinda sobre la superfície de la façana .....	77

Taula 32. Simulació amb ràfec 60cm tocant la llinda .....	78
Taula 33. Simulació 60cm tocant la llinda amb projecció de temperatures en el pla perpendicular que passa pel mig de la finestra més propera a la font d'ignició.....	79
Taula 34. Temperatures en la simulació 60cm tocant la llinda sobre la superfície de la façana .....	80
Taula 35. Simulació amb ràfec 80cm tocant la llinda .....	81
Taula 36. Simulació 80cm tocant la llinda amb projecció de temperatures en el pla perpendicular que passa pel mig de la finestra més propera a la font d'ignició.....	82
Taula 37. Temperatures en la simulació 80cm tocant la llinda sobre la superfície de la façana .....	83
Taula 38. Simulació amb ràfec 20+20cm tocant la llinda .....	84
Taula 39. Simulació 20+20cm tocant la llinda amb projecció de temperatures en el pla perpendicular que passa pel mig de la finestra més propera a la font d'ignició.....	85
Taula 40. Temperatures en la simulació 20+20cm tocant la llinda sobre la superfície de la façana .....	86
Taula 41. Simulació amb ràfec 40+20cm tocant la llinda .....	88
Taula 42. Simulació 40+20cm tocant la llinda amb projecció de temperatures en el pla perpendicular que passa pel mig de la finestra més propera a la font d'ignició.....	89
Taula 43. Temperatures en la simulació 40+20cm tocant la llinda sobre la superfície de la façana .....	90
Taula 44. Resum dels moments en que els vidres es trenquen en les simulacions dels ràfecs .....	90
Taula 45. Resum dels moments en que es trenquen els vidres en les simulacions sense ràfecs .....	91



## 5.1. Índex de gràfics

Gràfica 1 Comparativa de l'HHRPUV entre les diferents simulacions de façanes simples .....	45
Gràfica 2 Evolució de la calor alliberada per l'incendi en la façana.....	46
Gràfica 3 Evolució temperatures a l'interior per als diferents alers col·locats en la meitat per al termoparell 1 .....	91
Gràfica 4 Evolució temperatures a l'interior per als diferents alers col·locats en la meitat per al termoparell 2 .....	92
Gràfica 5 Evolució temperatures a l'interior per als diferents alers col·locats tocant la llinda per al termoparell 1 .....	92
Gràfica 6 Evolució temperatures a l'interior per als diferents alers col·locats tocant la llinda per al termoparell 2 .....	92
Gràfica 7 Evolució temperatures per al termoparell 0 per a tots els casos.....	94
Gràfica 8 Evolució temperatures per al termoparell 1 per al ràfec en la meitat .....	94
Gràfica 9 Evolució temperatures per al termoparell 2 per al ràfec en la meitat .....	94
Gràfica 10 Evolució temperatures per al termoparell 3 per al ràfec en la meitat .....	95
Gràfica 11 Evolució temperatures per al termoparell 1 per al ràfec tocant la llinda .....	95
Gràfica 12 Evolució temperatures per al termoparell 2 per al ràfec tocant la llinda .....	95
Gràfica 13 Evolució temperatures per al termoparell 3 per al ràfec tocant la llinda .....	96
Gràfica 14 Evolució de les temperatures per al termoparell 1 corresponents als casos 20, 40 i 20+20cm tocant la llinda .....	97
Gràfica 15 Evolució de les temperatures per al termoparell 1 corresponents als casos 40 i 20+20cm en la meitat .....	97
Gràfica 16 Evolució de les temperatures per al termoparell 1 corresponents al ràfec de 20cm .....	98

Gràfica 17 Evolució de les temperatures per al termoparell 1 corresponents al ràfec de 40cm .....	98
Gràfica 18 Evolució de les temperatures per al termoparell 1 corresponents al ràfec de 60cm .....	98
Gràfica 19 Evolució de les temperatures per al termoparell 1 corresponents al ràfec de 80cm .....	99
Gràfica 20 Evolució de les temperatures per al termoparell 1 corresponents al ràfec de 20+20cm .....	99
Gràfica 21 Evolució de les temperatures per al termoparell 1 corresponents al ràfec de 40+20cm .....	99

## 5.2. Índex de figures

Figura 1. Procés de carbonització de la fusta. Font: M <sup>a</sup> Dolors Mainar, 2016 .....	14
Figura 2. Les diferents seccions d'una biga en el procés d'una combustió. Font: M <sup>a</sup> Dolors Mainar, 2016 .....	15
Figura 3. Esquema de les vies de propagació del foc a través de les façanes. Font: Giraldo 2012 .....	21
Figura 4. Detall de la distància mínima entre obertures sense ràfec. Font: Codi Tècnic Espanyol sobre la seguretat en cas d'incendi .....	23
Figura 5. Detall de la distància mínima entre obertures amb ràfec. Font: Codi Tècnic Espanyol sobre la seguretat en cas d'incendi .....	23
Figura 6. Exemple gràfic d'un model de dues zones. Font: Giraldo, 2012 .....	30
Figura 7. Esquema de la discretització d'un escenari basat en el de Giraldo, 2012 .....	31
Figura 8. Equacions que regeixen el model de camp del programa FDS .....	33
Figura 9. Esquema general de la fase experimental de la recerca basat en el de Giraldo, 2012 .....	35

Figura 10. Detall de la secció de la façana escollida .....	36
Figura 11. Exemple de model simulat en la investigació.....	36
Figura 12. Recinte en la planta baixa on s'originarà l'incendi.....	36
Figura 13 Detall del ràfec incrustat en la façana .....	47
Figura 14. Detall de la franja de material no combustible en el model .....	62

## **AGRAÏMENTS**

A les meves tutores Ana i Pilar, ja que sense la seva guia no hauria aconseguit els objectius proposats.

A la meva família per tot el suport rebut, hauria estat tot molt més difícil. I, finalment, a tu Adriana per la col·laboració tant dins com fora de la investigació.